Collection A. Duco

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Term S

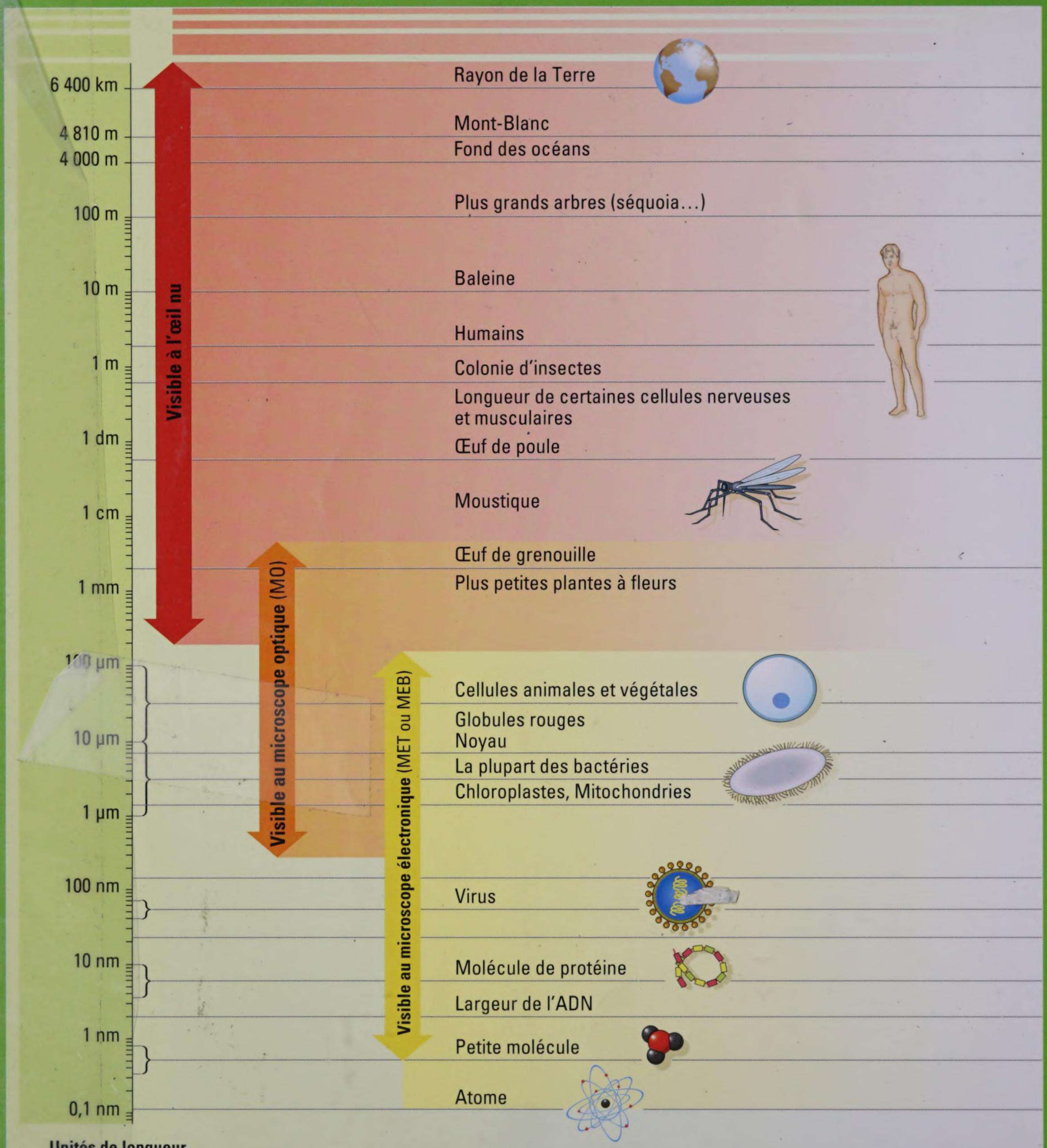
SVT

Lycée ARAGO - Paris
SVT - 2016 - 6485
9782701162591

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Programme 2012

Échelle des mesures



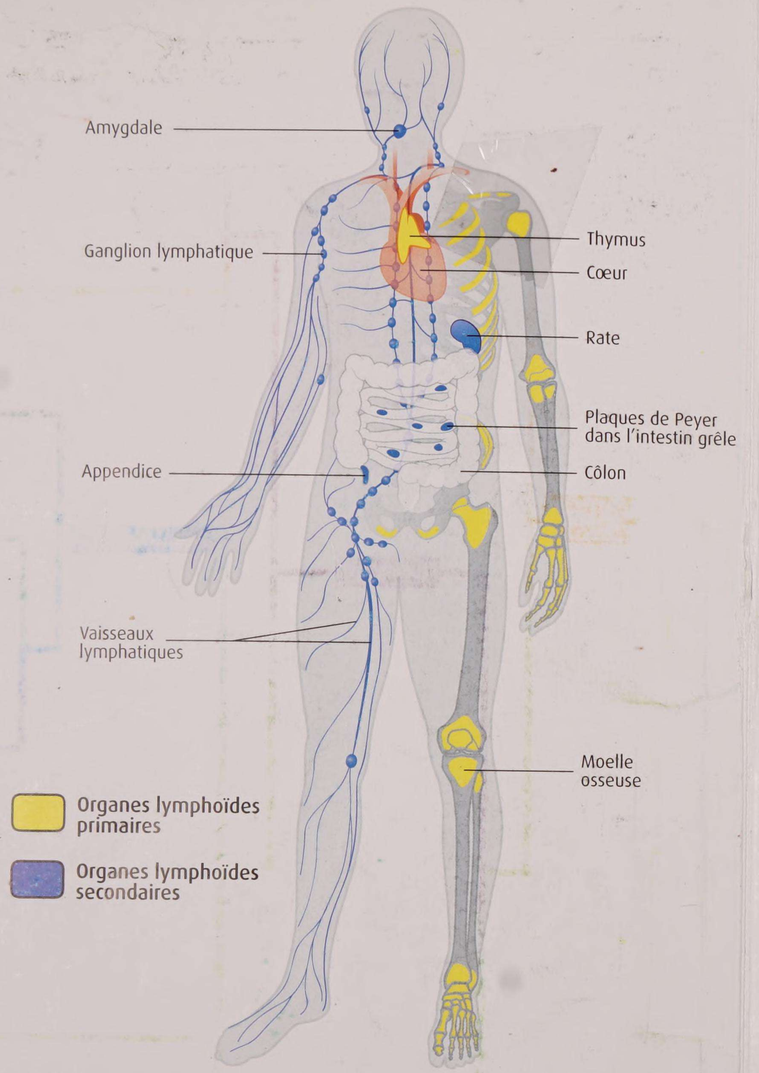
Unités de longueur

1 dm (décimètre) = 10^{-1} m
1 cm (centimètre) = 10^{-2} m
1 mm (millimètre) = 10^{-3} m
1 µm (micromètre) = 10^{-6} m
1 nm (nanomètre) = 10^{-9} m

Les organes lymphoïdes

• **Les organes lymphoïdes primaires** sont les lieux où les lymphocytes naïfs (n'ayant jamais rencontré d'agent infectieux) se différencient. Cette différenciation se déroule en permanence (que l'organisme soit ou non infecté) dans la moelle osseuse pour les lymphocytes B et dans le thymus pour les lymphocytes T.

• Une fois différenciés, les lymphocytes naïfs gagnent les vaisseaux lymphatiques et les **organes lymphoïdes secondaires**. En cas d'infection, c'est dans ces organes que les lymphocytes naïfs dont le récepteur membranaire (récepteur T des lymphocytes T ou anticorps membranaire des lymphocytes B) reconnaît un antigène de l'agent infectieux prolifèreront et se différencieront en cellules effectrices, au cours du processus de sélection clonale. Les organes lymphoïdes secondaires sont les ganglions lymphatiques, mais aussi la rate, les plaques de Peyer, les amygdales et l'appendice.

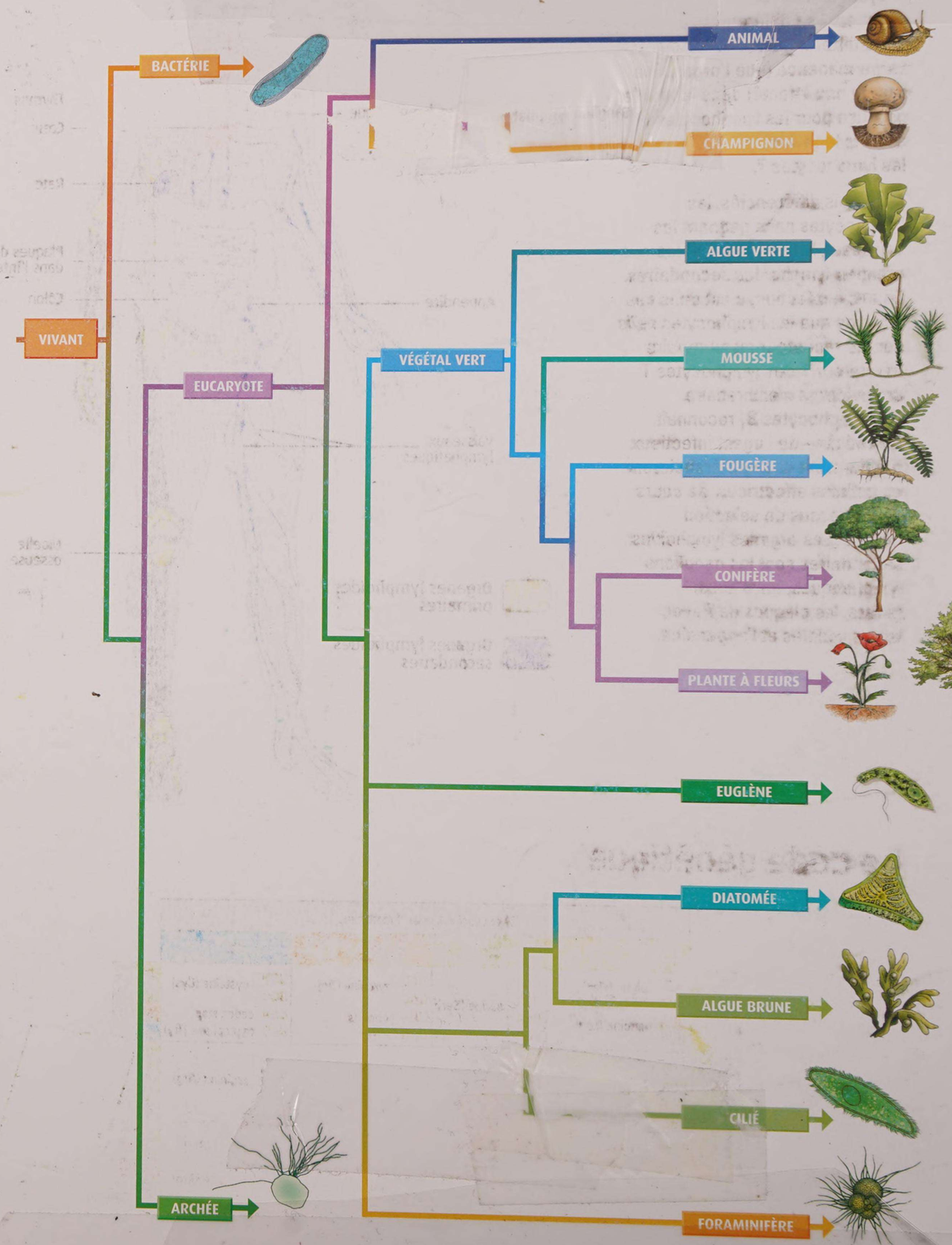


Le code génétique

Première lettre	Deuxième lettre U	Deuxième lettre C	Deuxième lettre A	Deuxième lettre G	Troisième lettre
U	UUU, UUC : phénylalanine (Phe) ; UUA, UUG : leucine (Leu)	UCU, UCC, UCA, UCG : sérine (Ser)	UAU, UAC : tyrosine (Tyr) ; UAA, UAG : codons stop	UGU, UGC : cystéine (Cys) ; UGA : codon stop ; UGG : tryptophane (Try)	U, C, A, G
C	CUU, CUC, CUA, CUG : leucine (Leu)	CCU, CCC, CCA, CCG : proline (Pro)	CAU, CAC : histidine (His) ; CAA, CAG : glutamine (Gln)	CGU, CGC, CGA, CGG : arginine (Arg)	U, C, A, G
A	AUU, AUC, AUA : isoleucine (Ile) ; AUG : méthionine (Met)	ACU, ACC, ACA, ACG : thréonine (Thr)	AAU, AAC : asparagine (Asn) ; AAA, AAG : lysine (Lys)	AGU, AGC : sérine (Ser) ; AGA, AGG : arginine (Arg)	U, C, A, G
G	GUU, GUC, GUA, GUG : valine (Val)	GCU, GCC, GCA, GCG : alanine (Ala)	GAU, GAC : acide aspartique (Asp) ; GAA, GAG : acide glutamique (Glu)	GGU, GGC, GGA, GGG : glycine (Gly)	U, C, A, G

Classification générale des êtres vivants

Source : *Comprendre et enseigner la classification du vivant* (2e édition), Belin, 2008.



LECIEVRE Thomas TS2 2012-2013
PONTONNIER Alice TS2 2014-2015
AZOULAY Benjamin TS3 2015-2016
Basil Londgren TS2
LAOUFI ◊ Mahdia - TS2 (18-19)

LYCÉES D'ILE-DE-FRANCE · RÉGION ILE-DE-FRANCE

LYCÉE ARAGO
075 0680 G
4, Place de la Nation
75012 PARIS
Tél. 01 43 07 37 40 - Fax 01 43 07 88 89

Collection A. Duco

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

TS

Term S

Directeur d'ouvrage
André Duco

Auteurs
Audrey Carpentier
Frédéric Celle
Pierre Chareyron
Grégoire Daoust
Pauline Deyme
Hervé Froissard
Laurent Geray
Céline Mémeteau
Claire Olive
Jean-Michel Picoche
Samuel Rebulard
Lucas Salomon
Andaine Seguin-Orlando
Romina Seyed
Didier Thomas
Anne Woehrlé

Coordinateur pédagogique
Claude Censier

Conseillers scientifiques
Rémi Cadet
Ludovic Orlando
André Schaaf

Programme 2012

8, RUE FÉROU 75278 PARIS CEDEX 06
WWW.EDITIONS-BELIN.COM

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

SOMMAIRE

Mode d'emploi du manuel 4
Le nouveau manuel de SVT Terminale S 6
Les outils du manuel pour se préparer au baccalauréat 7
Le programme 2012 et le manuel de SVT Terminale S 8

THÈME 1

Génétique, diversification et évolution du vivant **12**
Mobiliser ses acquis 14
Chapitre 1 Brassage génétique et diversification des génomes 17
Chapitre 2 La diversification du vivant 39
Chapitre 3 De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité 57
Chapitre 4 Un regard sur l'évolution de l'Homme 71
OBJECTIF BAC 92
ATELIERS D'EXPLORATION 94

THÈME 2

Relations entre organisation et mode de vie des plantes à fleurs **96**
Mobiliser ses acquis 98
Chapitre 1 Organisation des plantes à fleurs et vie fixée 101
Chapitre 2 Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée 117
OBJECTIF BAC 132
ATELIERS D'EXPLORATION 136

THÈME 3

Le domaine continental et sa dynamique **138**
Mobiliser ses acquis 140
Chapitre 1 Caractérisation du domaine continental 143
Chapitre 2 La formation des chaînes de montagnes 163
Chapitre 3 La production de nouveaux matériaux continentaux 181
Chapitre 4 La disparition des reliefs 199
OBJECTIF BAC 214
ATELIERS D'EXPLORATION 218

Le directeur d'ouvrage, les auteurs et les éditions Belin tiennent à remercier les personnes, établissements et sociétés suivantes pour leur aide précieuse lors de la réalisation du manuel : Le lycée du Parc à Lyon (P.-J. Bravo, son proviseur, et le personnel du laboratoire de SVT) ; M. Ainouche ; V. Barriel ; R. Bousquet ; N. Caudron ; F. Charron ; P. Cordier ; F. Darcy ; F. Depaulis ; P. Devincenzi ; I. Digard ; M. Diraison ; C. Duhem ; A. Gabriel ; A. Genter ; A. Ginolhac ; É. Heyer ; É. Husson ; D. Labe ; G. Lecointre ; J. Leibowitch ; C. Lenne ; B. Loppin ; F. Malartre ; A. Meinesz ; M. Morange ; D. Palissière ; P. Pla ; S. Prat ; C.-A. Reynaud ; C. Robert ; F. Salvadori ; J.-F. Saluzzo ; M.-A. Selosse ; R. Tavares ; P. Thomas ; J. Varet ; C. Vassiliadis ; C. Vidal : J.-L. Vigneresse ; J.-C. Weill ; la société Sciencéthic pour la mise au point des modélisations (www.sciencethic.fr) ; la société Sordalab (www.sordalab.com) pour le prêt de matériel.

Toutes les références à des sites Internet présentées dans cet ouvrage ont été vérifiées attentivement à la date d'impression. Compte tenu de la volatilité des sites et du détournement possible de leur adresse, les éditions Belin ne peuvent en aucun cas être tenues pour responsables de leur évolution. Nous appelons donc chaque utilisateur à rester vigilant quant à leur utilisation.

© Éditions Belin, 2012

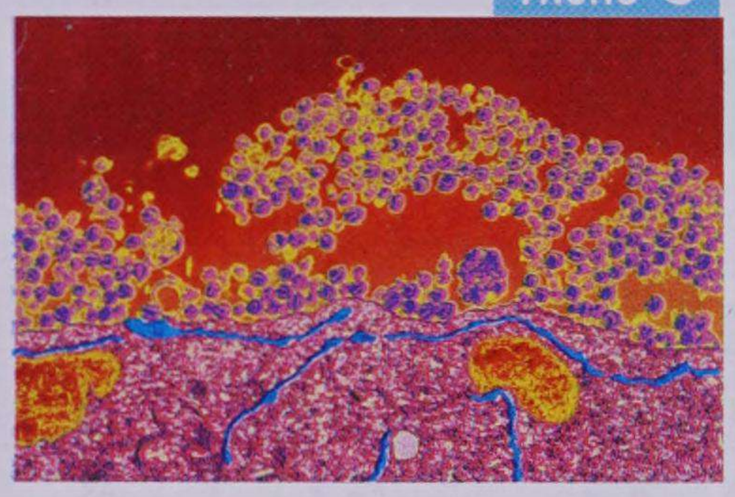
ISBN : 978-2-7011-6259-1

Sommaire détaillé p. 8.

THÈME 4

Enjeux planétaires contemporains — 220

Mobiliser ses acquis — 222
Chapitre 1 Géothermie et propriétés thermiques de la Terre — 225
Chapitre 2 La plante domestiquée — 241
OBJECTIF BAC — 258
ATELIERS D'EXPLORATION — 260



THÈME 5

Le maintien de l'intégrité de l'organisme — 262

Mobiliser ses acquis — 264
Chapitre 1 La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée — 267
Chapitre 2 L'immunité adaptative — 283
Chapitre 3 Le phénotype immunitaire au cours de la vie — 305
OBJECTIF BAC — 318
ATELIERS D'EXPLORATION — 320

THÈME 6

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse — 322

Mobiliser ses acquis — 324
Chapitre 1 Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle — 327
Chapitre 2 Motricité, volonté et plasticité cérébrale — 345
OBJECTIF BAC — 360
ATELIERS D'EXPLORATION — 364

Des outils pour un accompagnement personnalisé de l'élève

- Des exercices Objectif Bac
- Des exercices guidés
- Des ateliers d'exploration

voir p. 7

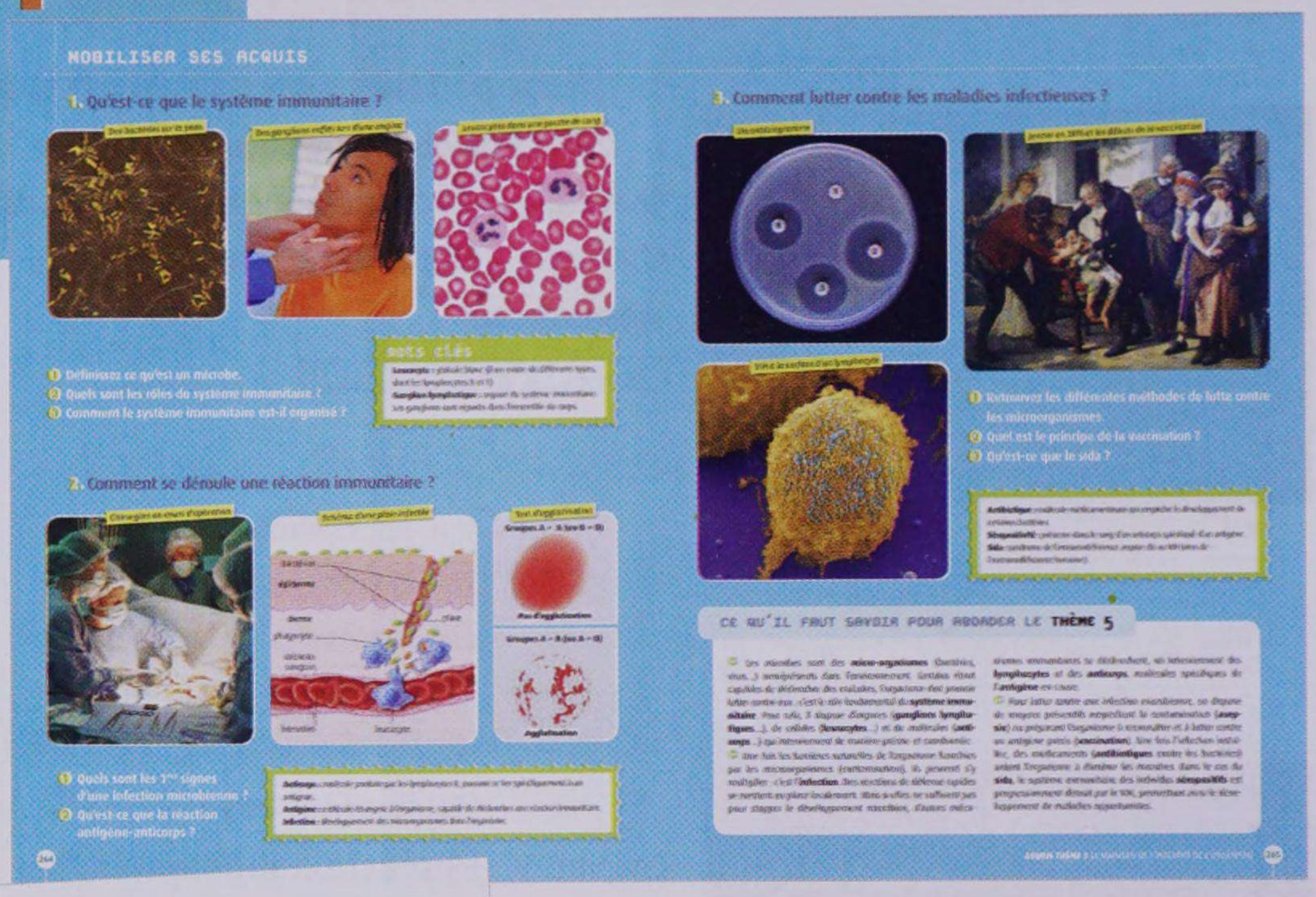
- Les corrigés d'exercices — 366
- Le Dico des SVT — 370
- Le Mémo-Bac — 377

Mode d'emploi du manuel

6 grands thèmes et 17 chapitres avec la même structure

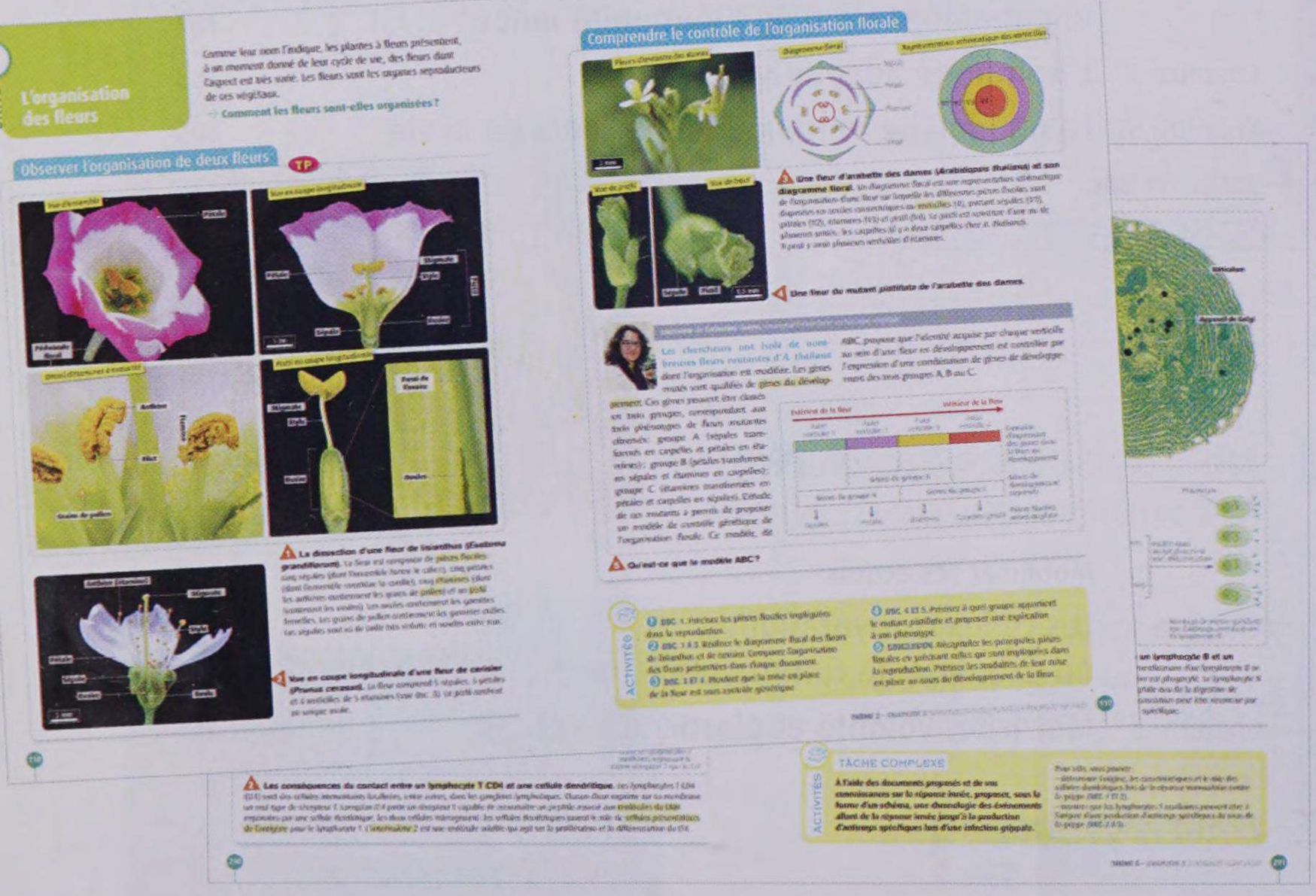
Avant de commencer

- Des documents à observer
- Des questions pour mobiliser les acquis
- Des mots clés
- Un rappel des notions indispensables



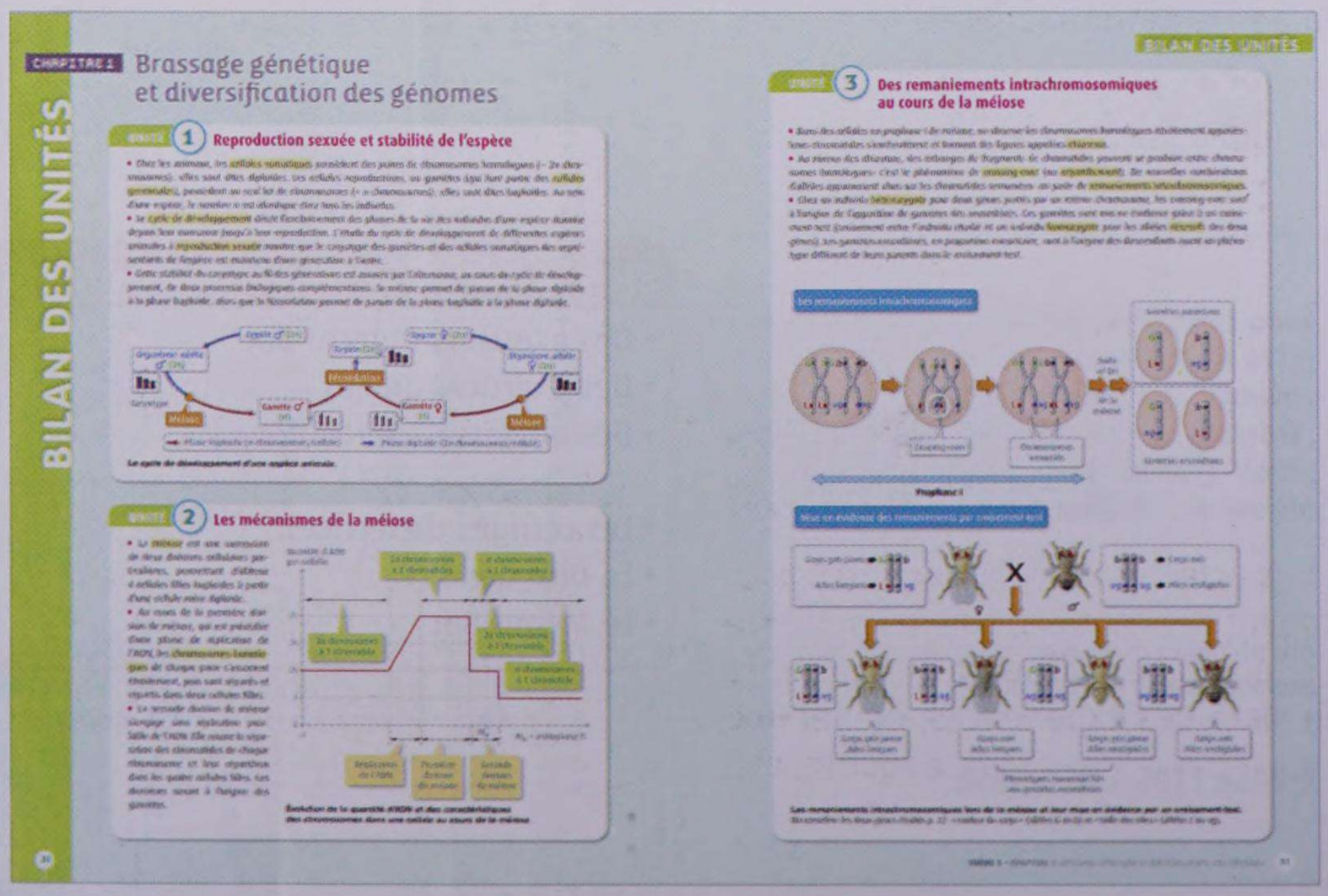
Les unités du chapitre

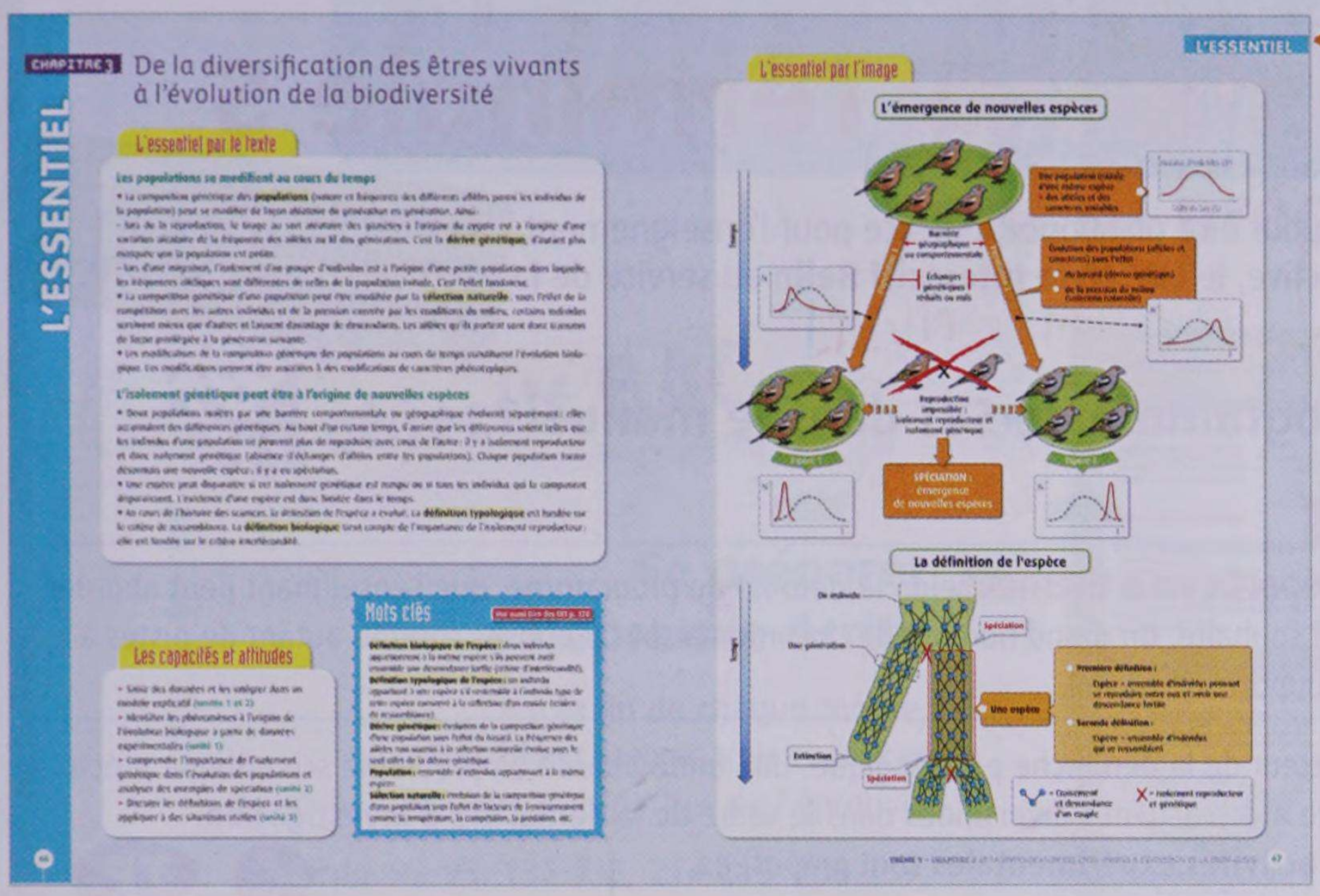
- Des documents à observer
- Des expériences à réaliser
- Des interviews de chercheurs
- Un questionnement guidé ou des activités en tâche complexe

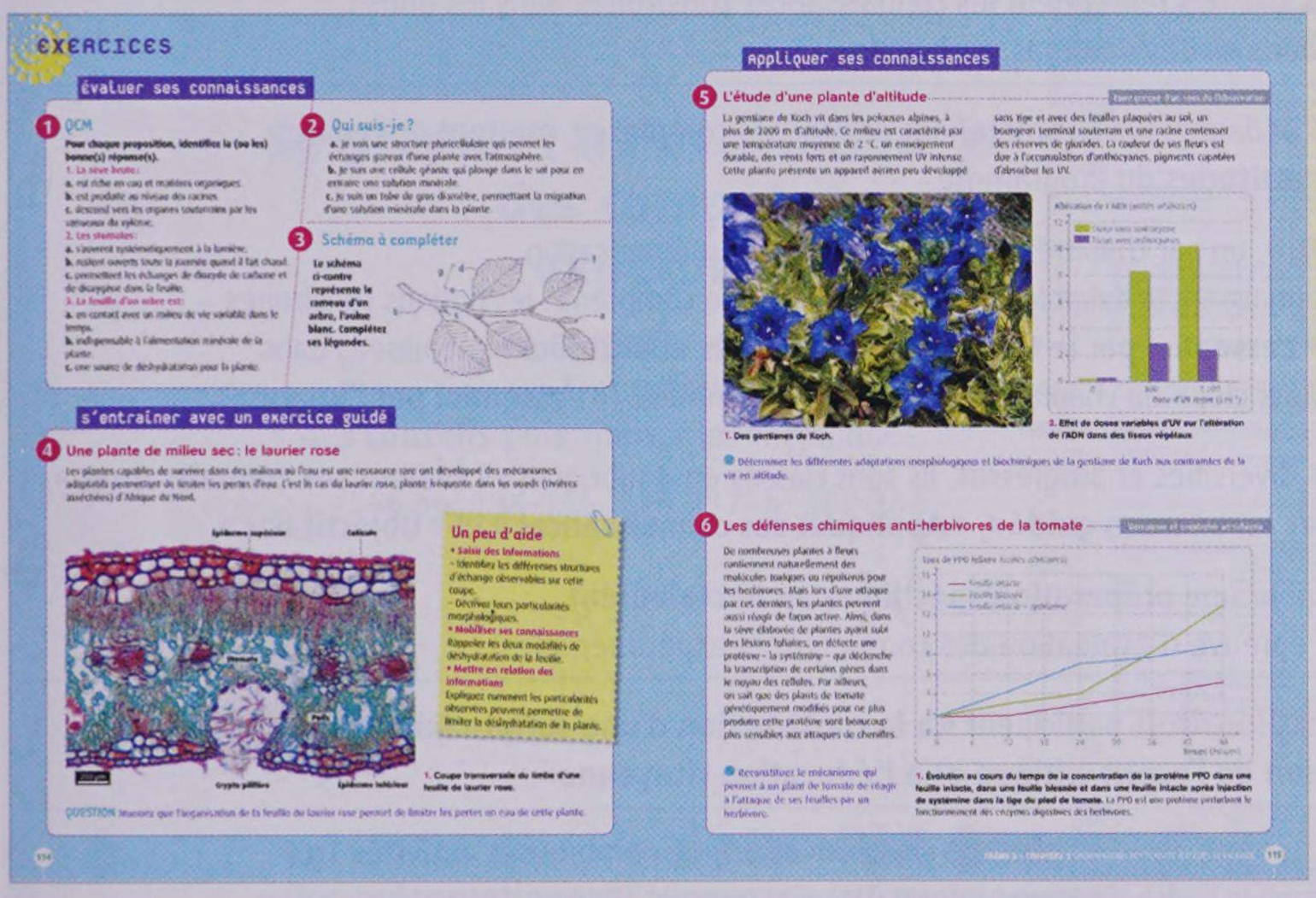


Le bilan des unités

- Les notions découvertes dans chaque unité
- Des schémas explicatifs pour faciliter la compréhension







L'essentiel

- L'essentiel par le texte
- L'essentiel par l'image
- Les capacités et attitudes
- Les mots clés du chapitre

objectif BAC

Voir page suivante

Pour s'entraîner au baccalauréat, à la fin de chaque thème :

- Un exemple d'épreuve écrite complète avec trois exercices à résoudre
- Un exemple d'épreuve d'évaluation des compétences expérimentales avec des activités à réaliser et des conseils pour utiliser les techniques

Les exercices du chapitre

- Évaluer ses connaissances
- S'entraîner avec un exercice guidé
- Appliquer ses connaissances

Les ateliers d'exploration

- Des activités complémentaires pour découvrir des métiers, suivre l'actualité scientifique, utiliser les TICE, mettre en place des expériences, mener une enquête, etc.

Le nouveau

manuel de SVT Terminale S

Ce nouveau manuel de SVT Terminale S est conçu pour être un support efficace pour l'enseignement. Il est accompagné de sa version numérique interactive, le **Lib' Livre Interactif Belin** au service de la liberté pédagogique de l'enseignant.

Retrouvez le Lib', Livre interactif de Belin : www.libtheque.fr/svtlycee

Comment est mis en œuvre le programme de SVT dans le manuel ?

LE PROGRAMME	LE MANUEL
« Les conditions d'exercice de la liberté pédagogique du professeur »	**17 chapitres répartis en 6 thèmes** selon le déroulé du programme, que l'enseignant peut aborder dans l'ordre qu'il souhaite. Un grand nombre de documents sont proposés comme autant de pistes à explorer et de supports de travail.
« La démarche d'investigation »	**80 Unités** au cœur de la démarche pédagogique. Une unité aborde un problème scientifique précis et renvoie l'élève à des activités diversifiées dans le cadre de la **démarche d'investigation**. De nombreuses **activités expérimentales** sont proposées. TP **17 Bilans des unités** reprennent les connaissances construites dans les unités, par des textes courts et des schémas explicatifs.
« Les compétences : une combinaison de connaissances, capacités et attitudes »	**320 Activités** pédagogiques, comprenant des tâches complexes, mettent en œuvre les **capacités et attitudes** du programme. **17 « L'essentiel »**, un par chapitre, facilitent le travail de mémorisation par l'élève des connaissances exigibles. Chaque double page comprend : les notions construites dans les unités (« **L'essentiel par le texte** »), « **Les capacités et attitudes** » mobilisées dans les unités, les « **Mots clés** » du chapitre et un schéma de synthèse (« **L'essentiel par l'image** »).
« L'évaluation des élèves »	**150 Exercices** diversifiés et progressifs. Ils sont classés en 4 rubriques : « **Évaluer ses connaissances** », « **S'entraîner avec un exercice guidé** », « **Appliquer ses connaissances** » et « **Objectif bac** ». **30 exercices** pour une **préparation spécifique au baccalauréat** (épreuve écrite, épreuve d'évaluation des compétences expérimentales) objectif BAC
« L'autonomie des élèves et le travail par atelier »	**24 Ateliers d'exploration** participent « **à la construction d'une culture scientifique** » et « **à la formation de l'esprit critique et à l'éducation citoyenne** ».
« Les technologies de l'information et de la communication »	Dans les **unités**, comme dans les **ateliers d'exploration**, de nombreuses **activités TICE** sont proposées dans le cadre du Brevet informatique et Internet (B2i).
« La pratique de démarches historiques »	Dans les **unités**, comme dans les **ateliers d'exploration**, de nombreuses références à l'**histoire des sciences**, l'**histoire des techniques** et à l'**art et la science**. HISTOIRE DES SCIENCES
« Les pistes : des prolongements du programme »	Dans les **unités**, les **exercices** et les **ateliers d'exploration**, des documents et des propositions d'activités pour orienter le travail des élèves dans le cadre de l'accompagnement personnalisé ou de clubs scientifiques. Piste

Capacités et attitudes (B. O.)

- Pratiquer une démarche scientifique (observer, questionner, formuler une hypothèse, expérimenter, raisonner avec rigueur, modéliser).
- Recenser, extraire et organiser des informations.
- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.
- Manipuler et expérimenter.
- Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes.
- Exprimer et exploiter des résultats, à l'écrit, à l'oral, en utilisant les technologies de l'information et de la communication.
- Communiquer dans un langage scientifiquement approprié : oral, écrit, graphique, numérique.
- Percevoir le lien entre sciences et techniques.
- Manifester sens de l'observation, curiosité, esprit critique.
- Montrer de l'intérêt pour les progrès scientifiques et techniques.
- Être conscient de sa responsabilité face à l'environnement, la santé, le monde vivant.
- Avoir une bonne maîtrise de son corps.
- Être conscient de l'existence d'implications éthiques de la science.
- Respecter les règles de sécurité.
- Comprendre la nature provisoire, en devenir, du savoir scientifique.
- Être capable d'attitude critique face aux ressources documentaires.
- Manifester de l'intérêt pour la vie publique et les grands enjeux de la société.
- Savoir choisir un parcours de formation.

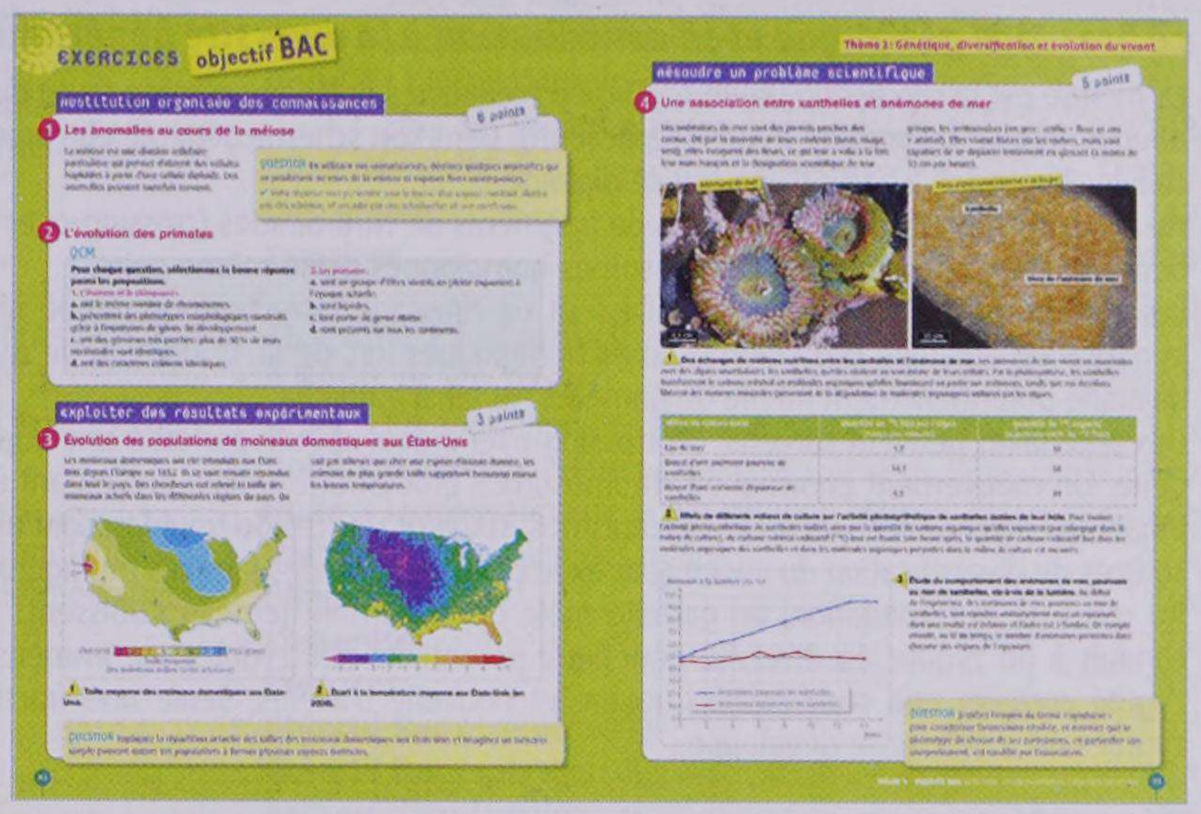
Les outils du manuel pour se préparer au baccalauréat

objectif BAC

Se préparer à l'épreuve écrite

- À la fin de chaque thème, un « **bac blanc** », avec trois exercices correspondant aux trois parties de l'épreuve.

➜ pp. 92-93, 132-133, 214-215, 258-259, 318- 319, 360-361

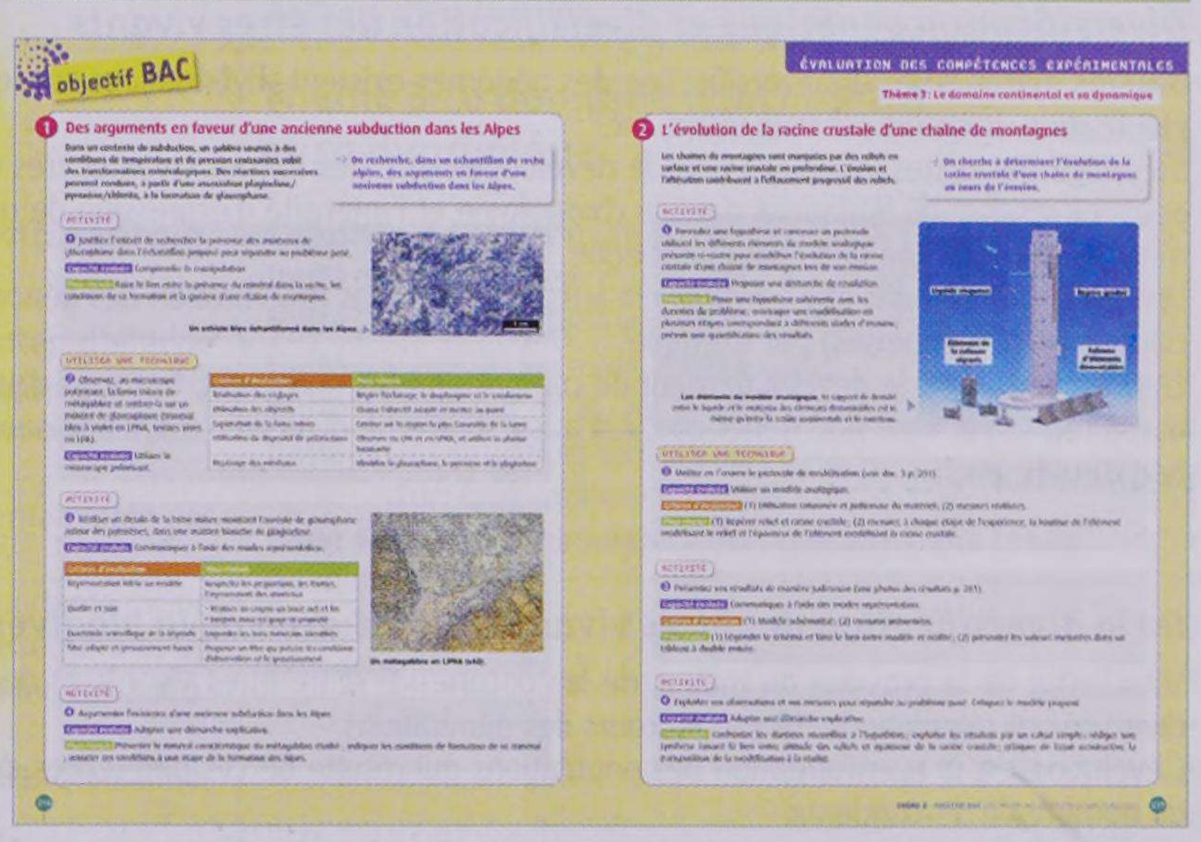


Se préparer à l'évaluation des compétences expérimentales

Six exemples de sujet avec :

- Des **activités** à réaliser.
- Des **conseils** pour utiliser les techniques.

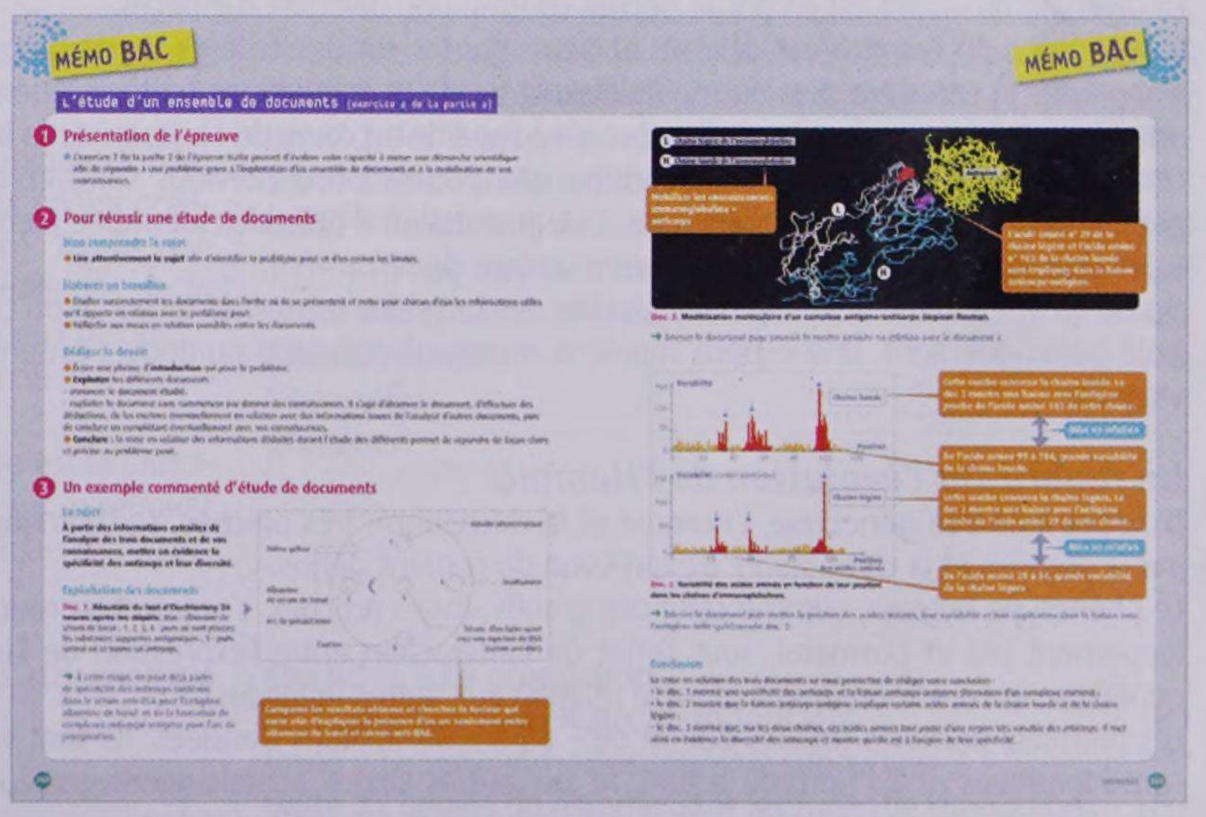
➜ pp. 134-135, 216-217, p. 362-363



Le Mémo-BAC

- Une **présentation** de l'épreuve de SVT au baccalauréat.
- Des **conseils** pour chaque type d'exercice (question de synthèse, QCM, étude de documents).
- Des **exemples commentés**

➜ pp. 377-381



D'autres outils

Le Dico des SVT

Tous les mots clés des chapitres, en lien avec les connaissances exigibles du programme.

➜ p. 370

Les métiers

onisep

Pour préparer les futures études supérieures en partenariat avec l'ONISEP, 6 ateliers d'exploration consacrés à la découverte de domaines professionnels en lien avec la SVT.

➜ pp. 95, 136, 219, 260, 321, 365

LE PROGRAMME 2012 DE SVT TERMINALE S ET LE NOUVEAU MANUEL

B.O. du 13 oct. 2011

I. La Terre dans l'Univers, la vie, l'évolution du vivant

Connaissances du programme	Chapitres du manuel
A. Génétique et évolution	**Thème 1 : Génétique, diversification et évolution du vivant** 12
Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique La méiose est la succession de deux divisions cellulaires précédée comme toute division d'un doublement de la quantité d'ADN (réplication). Dans son schéma général, elle produit quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. Au cours de la méiose, des échanges de fragments de chromatides (crossing-over ou enjambement) se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire. Les chromosomes ainsi remaniés subissent un brassage interchromosomique résultant de la migration aléatoire des chromosomes homologues lors de la 1re division de méiose. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite. Des anomalies peuvent survenir. Un crossing-over inégal aboutit parfois à une duplication de gène. Un mouvement anormal de chromosomes produit une cellule présentant un nombre inhabituel de chromosomes. Ces mécanismes, souvent sources de troubles, sont aussi parfois sources de diversification du vivant (par exemple à l'origine des familles multigéniques). Au cours de la fécondation, un gamète mâle et un gamète femelle s'unissent : leur fusion conduit à un zygote. La diversité génétique potentielle des zygotes est immense. Chaque zygote contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles. Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe.	**Chapitre 1** Brassage génétique et diversification des génomes 17 **Unité 1** Reproduction sexuée et stabilité de l'espèce 18 **Unité 2** Les mécanismes de la méiose 20 **Unité 3** Des remaniements intrachromosomiques au cours de la méiose 22 **Unité 4** Le brassage génétique lors de la méiose 24 **Unité 5** Le brassage génétique lors de la fécondation 26 **Unité 6** Les anomalies lors de la méiose 28 **Bilan des unités** 30 **L'essentiel** 34 **Exercices** 36
Diversification génétique et diversification des êtres vivants D'autres mécanismes de diversification des génomes existent : hybridations suivies de polyploïdisation, transfert par voie virale, etc. S'agissant des gènes impliqués dans le développement, des formes vivantes très différentes peuvent résulter de variations dans la chronologie et l'intensité d'expression de gènes communs, plus que d'une différence génétique. Une diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes : associations (dont symbioses) par exemple. Chez les vertébrés, le développement de comportements nouveaux, transmis d'une génération à l'autre par voie non génétique, est aussi source de diversité : chants d'oiseaux, utilisation d'outils, etc.	**Chapitre 2** La diversification du vivant 39 **Unité 1** Modifications du développement et diversification du vivant 40 **Unité 2** Transferts de gènes entre espèces et diversification du vivant 42 **Unité 3** Associations de génomes et diversification du vivant 44 **Unité 4** Symbioses et diversification du vivant 46 **Unité 5** Diversification des comportements et diversification du vivant 48 **Bilan des unités** 50 **L'essentiel** 52 **Exercices** 54
De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations change au cours des générations. L'évolution est la transformation des populations qui résulte de ces différences de survie et du nombre de descendants. La diversité du vivant est en partie décrite comme une diversité d'espèces. La définition de l'espèce est délicate et peut reposer sur des critères variés qui permettent d'apprécier le caractère plus ou moins distinct de deux populations (critères phénotypiques, interfécondité, etc.). Le concept d'espèce s'est modifié au cours de l'histoire de la biologie. Une espèce peut être considérée comme une population d'individus suffisamment isolés génétiquement des autres populations. Une population d'individus identifiée comme constituant une espèce n'est définie que durant un laps de temps fini. On dit qu'une espèce disparaît si l'ensemble des individus concernés disparaît ou cesse d'être isolé génétiquement. Une espèce supplémentaire est définie si un nouvel ensemble s'individualise.	**Chapitre 3** De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité 57 **Unité 1** Les modifications des populations au cours du temps 58 **Unité 2** De l'évolution des populations à l'évolution des espèces 60 **Unité 3** La définition d'une espèce 62 **Bilan des unités** 64 **L'essentiel** 66 **Exercices** 68
Un regard sur l'évolution de l'Homme D'un point de vue génétique, l'Homme et le chimpanzé, très proches, se distinguent surtout par la position et la chronologie d'expression de certains gènes. Le phénotype humain, comme celui des grands singes proches, s'acquiert au cours du développement pré et postnatal, sous l'effet de l'interaction entre l'expression de l'information génétique et l'environnement (dont la relation aux autres individus). Les premiers primates fossiles datent de – 65 à – 50 millions d'années. Ils sont variés et ne sont identiques ni à l'Homme actuel, ni aux autres singes actuels. La diversité des grands primates connue par les fossiles, qui a été grande, est aujourd'hui réduite. Homme et chimpanzé partagent un ancêtre commun récent. Aucun fossile ne peut être à coup sûr considéré comme un ancêtre de l'homme ou du chimpanzé. Le genre *Homo* regroupe l'Homme actuel et quelques fossiles qui se caractérisent notamment par une face réduite, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette, un style de bipédie avec trou occipital avancé et aptitude à la course à pied, une mandibule parabolique, etc. Production d'outils complexes et variété des pratiques culturelles sont associées au genre *Homo*, mais de façon non exclusive. La construction précise de l'arbre phylogénétique du genre *Homo* est controversée dans le détail.	**Chapitre 4** Un regard sur l'évolution de l'Homme 71 **Unité 1** La diversité actuelle et passée des primates 72 **Unité 2** La place de l'Homme parmi les grands primates 74 **Unité 3** La comparaison génétique entre Homme et chimpanzés 76 **Unité 4** La construction du phénotype des grands primates 78 **Unité 5** La définition du genre *Homo* 80 **Unité 6** La diversité passée du genre *Homo* 82 **Unité 7** Des relations de parenté débattues 84 **Bilan des unités** 86 **L'essentiel** 88 **Exercices** 90 **Objectif Bac** épreuve écrite 92 **Ateliers d'exploration** 94

A. (suite) Génétique et évolution

Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes à fleurs

Les caractéristiques de la plante sont en rapport avec la vie fixée à l'interface sol/air dans un milieu variable au cours du temps.
Elle développe des surfaces d'échanges de grande dimension avec l'atmosphère (échanges de gaz, capture de la lumière) et avec le sol (échange d'eau et d'ions). Des systèmes conducteurs permettent les circulations de matières dans la plante, notamment entre systèmes aérien et souterrain. Elle possède des structures et des mécanismes de défense (contre les agressions du milieu, les prédateurs, les variations saisonnières).

L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées.
La pollinisation de nombreuses plantes repose sur une collaboration animal pollinisateur/plante produit d'une coévolution.
À l'issue de la fécondation, la fleur se transforme en fruits contenant des graines.
La dispersion des graines est nécessaire à la survie et à la dispersion de la descendance. Elle repose souvent sur une collaboration animal disséminateur/plante produit d'une coévolution.

B. Le domaine continental et sa dynamique

La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

La lithosphère est en équilibre (isostasie) sur l'asthénosphère. Les différences d'altitude moyenne entre les continents et les océans s'expliquent par des différences crustales.
La croûte continentale, principalement formée de roches voisines du granite, est d'une épaisseur plus grande et d'une densité plus faible que la croûte océanique.
L'âge de la croûte océanique n'excède pas 200 Ma, alors que la croûte continentale date par endroit de plus de 4 Ga. Cet âge est déterminé par radiochronologie.
Au relief positif qu'est la chaîne de montagnes, répond, en profondeur, une importante racine crustale. L'épaisseur de la croûte résulte d'un épaississement lié à un raccourcissement et un empilement. On en trouve des indices tectoniques (plis, failles, nappes) et des indices pétrographiques (métamorphisme, traces de fusion partielle).
Les résultats conjugués des études tectoniques et minéralogiques permettent de reconstituer un scénario de l'histoire de la chaîne.

La convergence lithosphérique : contexte de la formation des chaînes de montagnes

Les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'un domaine océanique disparu (ophiolites) et d'anciennes marges continentales passives. La « suture » de matériaux océaniques résulte de l'affrontement de deux lithosphères continentales (collision). Tandis que l'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, la partie supérieure de la croûte s'épaissit par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques.
Les matériaux océaniques et continentaux montrent les traces d'une transformation minéralogique à grande profondeur au cours de la subduction.
La différence de densité entre l'asthénosphère et la lithosphère océanique âgée est la principale cause de la subduction. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit et s'épaissit. L'augmentation de sa densité au-delà d'un seuil d'équilibre explique son plongement dans l'asthénosphère. En surface, son âge n'excède pas 200 Ma.

Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

Dans les zones de subduction, des volcans émettent des laves souvent visqueuses associées à des gaz et leurs éruptions sont fréquemment explosives.
La déshydratation des matériaux de la croûte océanique subduite libère de l'eau qu'elle a emmagasinée au cours de son histoire, ce qui provoque la fusion partielle des péridotites du manteau sus-jacent.
Si une fraction des magmas arrive en surface (volcanisme), la plus grande partie cristallise en profondeur et donne des roches à structure grenue de type granitoïde. Un magma, d'origine mantellique, aboutit ainsi à la création de nouveau matériau continental.

Thème 2 Relations entre organisation et mode de vie des plantes à fleurs 96

Chapitre 1 Organisation des plantes à fleurs et vie fixée 101
Unité 1 Les plantes à fleurs dans leur environnement 102
Unité 2 Les échanges des plantes à fleurs avec leur milieu 104
Unité 3 La circulation de matières dans une plante à fleurs 106
Unité 4 La lutte contre les agressions chez les plantes à fleurs 108
Bilan des unités 110
L'essentiel 112
Exercices 114

Chapitre 2 Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée 117
Unité 1 L'organisation des fleurs 118
Unité 2 De la fleur au fruit 120
Unité 3 La réalisation de la pollinisation croisée 122
Unité 4 La dispersion des graines 124
Bilan des unités 126
L'essentiel 128
Exercices 130
Objectif Bac épreuve écrite 132
Objectif Bac évaluation des capacités expérimentales 134
Ateliers d'exploration 136

Thème 3 Le domaine continental et sa dynamique 138

Chapitre 1 Caractérisation du domaine continental 143
Unité 1 La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère 144
Unité 2 La dualité d'altitude entre océans et continents 146
Unité 3 L'âge de la croûte continentale 148
Unité 4 Épaisseur de la croûte et reliefs continentaux 150
Unité 5 Des structures témoignant d'un épaississement crustal 152
Unité 6 Des roches témoignant d'un épaississement crustal 154
Bilan des unités 156
L'essentiel 158
Exercices 160

Chapitre 2 La formation des chaînes de montagnes 163
Unité 1 Des lambeaux de lithosphère océanique 164
Unité 2 Des vestiges de marges continentales 166
Unité 3 Des transformations minéralogiques
Unité 4 Un scénario de la formation d'une chaîne de montagnes 168
Unité 5 Le moteur de la subduction 170
Bilan des unités 172
L'essentiel 174
Exercices 176
178

Chapitre 3 La production de nouveaux matériaux continentaux 181
Unité 1 Le volcanisme des zones de subduction 182
Unité 2 L'origine du magma dans les zones de subduction 184
Unité 3 L'hydratation du manteau dans les zones de subduction 186
Unité 4 La production de roches plutoniques dans les zones de subduction 188
Unité 5 La fabrication de croûte continentale 190
Bilan des unités 192
L'essentiel 194
Exercices 196

La disparition des reliefs

Les chaînes de montagnes anciennes ont des reliefs moins élevés que les plus récentes. On y observe à l'affleurement une plus forte proportion de matériaux transformés et/ou formés en profondeur. Les parties superficielles des reliefs tendent à disparaître.
Altération et érosion contribuent à l'effacement des reliefs.
Les produits de démantèlement sont transportés sous forme solide ou soluble, le plus souvent par l'eau, jusqu'en des lieux plus ou moins éloignés où ils se déposent (sédimentation).
Des phénomènes tectoniques participent aussi à la disparition des reliefs.
L'ensemble de ces phénomènes débute dès la naissance du relief et constitue un vaste recyclage de la croûte continentale.

Chapitre 4 La disparition des reliefs 199
Unité 1 L'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes 200
Unité 2 Altération et érosion des reliefs 202
Unité 3 Des processus tectoniques participant à la disparition des reliefs 204
Unité 4 Le recyclage de la lithosphère continentale 206
Bilan des unités 208
L'essentiel 210
Exercices 212
Objectif Bac épreuve écrite 214
Objectif Bac évaluation des capacités expérimentales 216
Ateliers d'exploration 218

II. Enjeux planétaires contemporains

Connaissances du programme	Chapitres du manuel
A. Géothermie et propriétés thermiques de la Terre	Thème 4 Enjeux planétaires contemporains 220
La température croît avec la profondeur (gradient géothermique); un flux thermique atteint la surface en provenance des profondeurs de la Terre (flux géothermique). Gradients et flux varient selon le contexte géodynamique. Le flux thermique a pour origine principale la désintégration des substances radioactives contenues dans les roches. Deux mécanismes de transfert thermique existent dans la Terre : la convection et la conduction. Le transfert par convection est beaucoup plus efficace. À l'échelle globale, le flux fort dans les dorsales est associé à la production de lithosphère nouvelle; au contraire, les zones de subduction présentent un flux faible associé au plongement de la lithosphère âgée devenue dense. La Terre est une machine thermique. L'énergie géothermique utilisable par l'Homme est variable d'un endroit à l'autre. Le prélèvement éventuel d'énergie par l'Homme ne représente qu'une infime partie de ce qui est dissipé.	**Chapitre 1** Géothermie et propriétés thermiques de la Terre 225 **Unité 1** L'exploitation de l'énergie géothermique en France 226 **Unité 2** Origine et utilisation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale 228 **Unité 3** Le transfert de l'énergie thermique au sein de la planète 230 **Unité 4** La Terre, machine thermique 232 **Bilan des unités** 234 **L'essentiel** 236 **Exercices** 238
B. La plante domestiquée	
La sélection exercée par l'Homme sur les plantes cultivées a souvent retenu (volontairement ou empiriquement) des caractéristiques génétiques différentes de celles qui sont favorables pour les plantes sauvages. Une même espèce cultivée comporte souvent plusieurs variétés sélectionnées selon des critères différents; c'est une forme de biodiversité. Les techniques de croisement permettent d'obtenir de nouvelles plantes qui n'existaient pas dans la nature (nouvelles variétés, hybrides, etc.). Les techniques du génie génétique permettent d'agir directement sur le génome des plantes cultivées.	**Chapitre 2** La plante domestiquée 241 **Unité 1** L'origine des espèces cultivées 242 **Unité 2** Les bases génétiques de la domestication 244 **Unité 3** La sélection variétale 246 **Unité 4** Techniques de croisement et biodiversité cultivée 248 **Unité 5** Génie génétique et plantes cultivées 250 **Bilan des unités** 252 **L'essentiel** 254 **Exercices** 256 **Objectif Bac** épreuve écrite 258 **Ateliers d'exploration** 260

III. Corps humain et santé

Connaissances du programme	Chapitres du manuel
A. Le maintien de l'intégrité de l'organisme : quelques aspects de la réaction immunitaire	Thème 5 Le maintien de l'intégrité de l'organisme 262
La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée L'immunité innée ne nécessite pas d'apprentissage préalable, est génétiquement héritée et est présente dès la naissance. Elle repose sur des mécanismes de reconnaissance et d'action très conservés au cours de l'évolution. Très rapidement mise en œuvre, l'immunité innée est la première à intervenir lors de situations variées (atteintes des tissus, infection, cancer). C'est une première ligne de défense qui agit d'abord seule puis se prolonge pendant toute la réaction immunitaire. La réaction inflammatoire aiguë en est un mécanisme essentiel. Elle fait suite à l'infection ou à la lésion d'un tissu et met en jeu des molécules à l'origine de symptômes stéréotypés (rougeur, chaleur, gonflement, douleur). Elle prépare le déclenchement de l'immunité adaptative.	**Chapitre 1** La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée 267 **Unité 1** Les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë 268 **Unité 2** L'initiation de la réaction inflammatoire aiguë 270 **Unité 3** L'action des médiateurs chimiques de l'inflammation 272 **Unité 4** L'issue de la réaction inflammatoire aiguë 274 **Bilan des unités** 276 **L'essentiel** 278 **Exercices** 280

L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée

Alors que l'immunité innée est largement répandue chez les êtres vivants, l'immunité adaptative est propre aux vertébrés. Elle s'ajoute à l'immunité innée et assure une action plus spécifique contre des molécules, ou partie de molécules.
Les cellules de l'immunité adaptative ne deviennent effectrices qu'après une première rencontre avec un antigène grâce aux phénomènes de sélection, d'amplification et de différenciation clonales.
Les défenses adaptatives associées avec les défenses innées permettent normalement d'éliminer la cause du déclenchement de la réaction immunitaire.
Le système immunitaire, normalement, ne se déclenche pas contre des molécules de l'organisme ou de ses symbiotes. Cela est vrai notamment pour la réponse adaptative.
Pourtant, les cellules de l'immunité adaptative, d'une grande diversité, sont produites aléatoirement par des mécanismes génétiques complexes qui permettent potentiellement de répondre à une multitude de molécules. La maturation du système immunitaire résulte d'un équilibre dynamique entre la production de cellules et la répression ou l'élimination des cellules autoréactives.

Chapitre 2 L'immunité adaptative 283
Unité 1 La réponse adaptative humorale 284
Unité 2 Le mode d'action des anticorps 286
Unité 3 La réponse adaptative cellulaire 288
Unité 4 L'origine des anticorps 290
Unité 5 La maturation du système immunitaire 292
Unité 6 VIH et sida 294
Bilan des unités 296
L'essentiel 300
Exercices 302

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Une fois formés, certains effecteurs de l'immunité adaptative sont conservés grâce à des cellules mémoire à longue durée de vie.
Cette mémoire immunitaire permet une réponse secondaire à l'antigène plus rapide et quantitativement plus importante qui assure une protection de l'organisme vis-à-vis de cet antigène.
La vaccination déclenche une telle mémorisation. L'injection de produits immunogènes mais non pathogènes (particules virales, virus atténués, etc.) provoque la formation d'un pool de cellules mémoires dirigées contre l'agent d'une maladie. L'adjuvant du vaccin déclenche la réaction innée indispensable à l'installation de la réaction adaptative.
Le phénotype immunitaire d'un individu se forme au gré des expositions aux antigènes et permet son adaptation à l'environnement. La vaccination permet d'agir sur ce phénomène.
La production aléatoire de lymphocytes naïfs est continue tout au long de la vie mais, au fil du temps, le pool des lymphocytes mémoires augmente.

Chapitre 3 Le phénotype immunitaire au cours de la vie 305
Unité 1 La mémoire immunitaire 306
Unité 2 La vaccination 308
Unité 3 L'évolution du phénotype immunitaire 310
Bilan des unités 312
L'essentiel 314
Exercices 316
Objectif Bac épreuve écrite 318
Ateliers d'exploration 320

B. Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

Thème 6 Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse 322

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

Le réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique. Il met en jeu différents éléments qui constituent l'arc réflexe.
Le neurone moteur conduit un message nerveux codé en fréquence de potentiels d'actions.
La commande de la contraction met en jeu le fonctionnement de la synapse neuromusculaire.

Chapitre 1 Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle 327
Unité 1 Les caractéristiques d'un réflexe myotatique 328
Unité 2 Les voies nerveuses d'un réflexe myotatique 330
Unité 3 Les neurones impliqués dans un réflexe myotatique 332
Unité 4 Nature et transmission du message nerveux 334
Unité 5 Le fonctionnement de la synapse neuromusculaire 336
Bilan des unités 338
L'essentiel 340
Exercices 342

De la volonté au mouvement

L'exploration du cortex cérébral permet de découvrir les aires motrices spécialisées à l'origine des mouvements volontaires. Les messages nerveux moteurs qui partent du cerveau cheminent par des faisceaux de neurones qui descendent dans la moelle jusqu'aux motoneurones. C'est ce qui explique les effets paralysants des lésions médullaires.
Le corps cellulaire du motoneurone reçoit des informations diverses qu'il intègre sous la forme d'un message moteur unique et chaque fibre musculaire reçoit le message d'un seul motoneurone.

Motricité et plasticité cérébrale

La comparaison des cartes motrices de plusieurs individus montre des différences importantes. Loin d'être innées, ces différences s'acquièrent au cours du développement, de l'apprentissage des gestes et de l'entraînement.
Cette plasticité cérébrale explique aussi les capacités de récupération du cerveau après la perte de fonction accidentelle d'une petite partie du cortex moteur. Les capacités de remaniements se réduisent tout au long de la vie, de même que le nombre de cellules nerveuses. C'est donc un capital à préserver et entretenir.

Chapitre 2 Motricité, volonté et plasticité cérébrale 345
Unité 1 La commande volontaire du mouvement 346
Unité 2 Les voies motrices : du cortex aux muscles 348
Unité 3 Plasticité cérébrale et apprentissage moteur 350
Unité 4 Plasticité cérébrale et médecine 352
Bilan des unités 354
L'essentiel 356
Exercices 358
Objectif Bac épreuve écrite 360
Objectif Bac évaluation des capacités expérimentales 362
Ateliers d'exploration 364

Capacités et attitudes du programme → voir p. 6

THÈME 1

Génétique, diversification et évolution du vivant

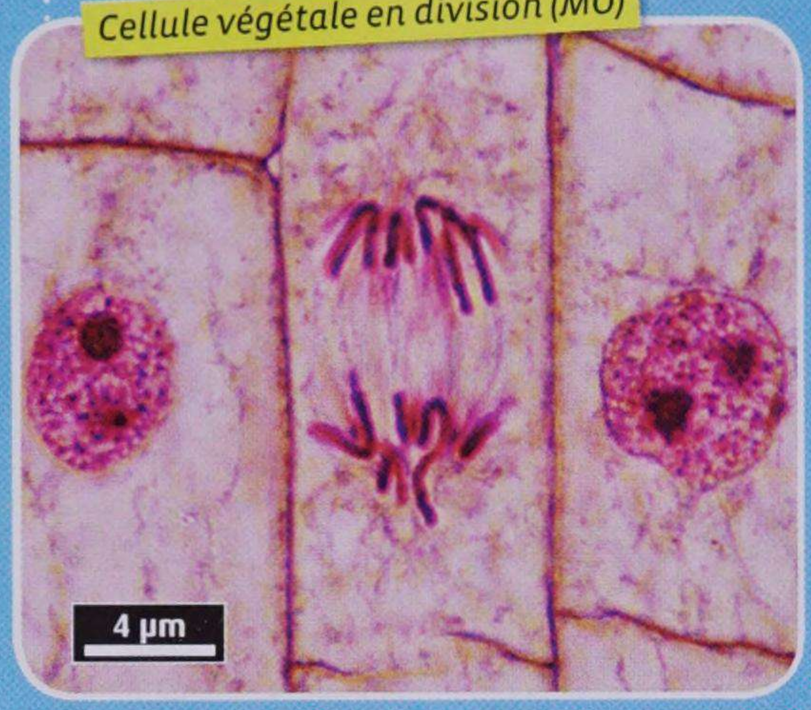
MOBILISER SES ACQUIS p. 14

1. Brassage génétique et diversification des génomes p. 17
2. La diversification du vivant p. 39
3. De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité p. 57
4. Un regard sur l'évolution de l'Homme p. 71

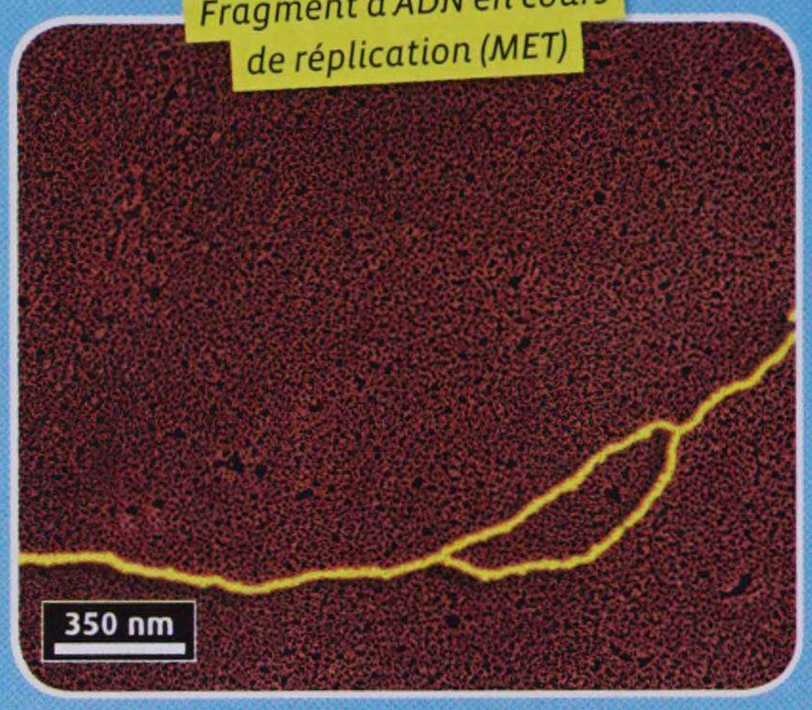
Une branche, sept espèces d'oiseaux.

1. Quelle est l'origine de la diversité génétique dans une espèce ?

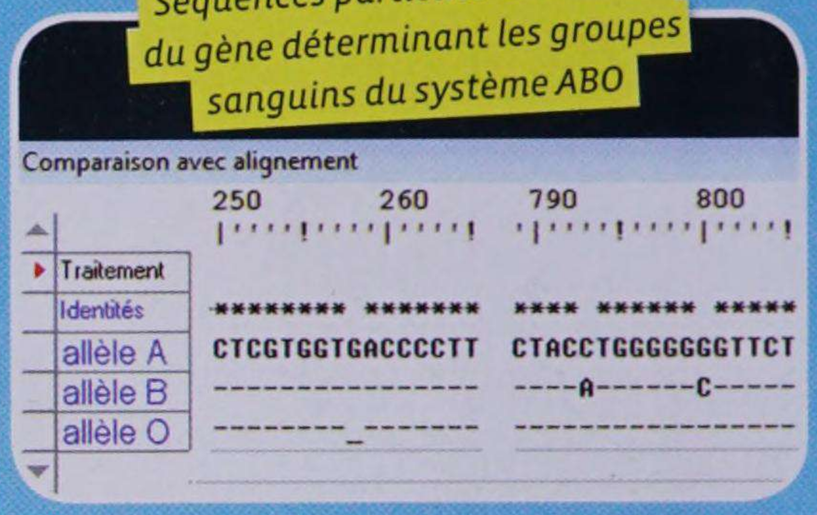
Cellule végétale en division (MO)



Fragment d'ADN en cours de réplication (MET)



Séquences partielles des allèles du gène déterminant les groupes sanguins du système ABO



1. **Expliquez en quoi la mitose est une division cellulaire conforme.**
2. **Qu'est-ce qu'un allèle et quel processus entraîne une diversité allélique ?**
3. **Montrez que les allèles participent à la diversité génétique au sein d'une espèce.**

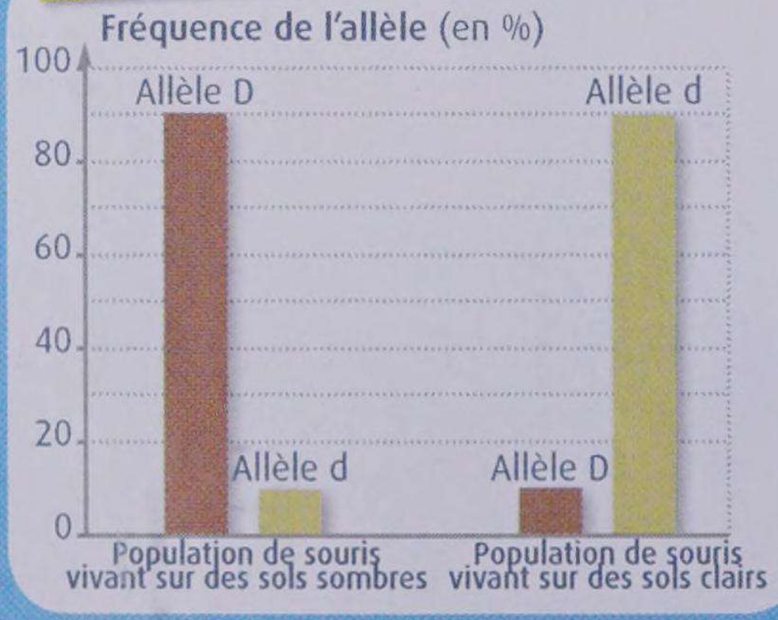
mots clés

Mitose : division cellulaire conforme au cours d'un cycle cellulaire.
Mutation : modification de la séquence nucléotidique d'un gène.
Réplication (de l'ADN) : mécanisme où la molécule d'ADN se duplique à l'identique lors de la phase S de l'interphase du cycle cellulaire.

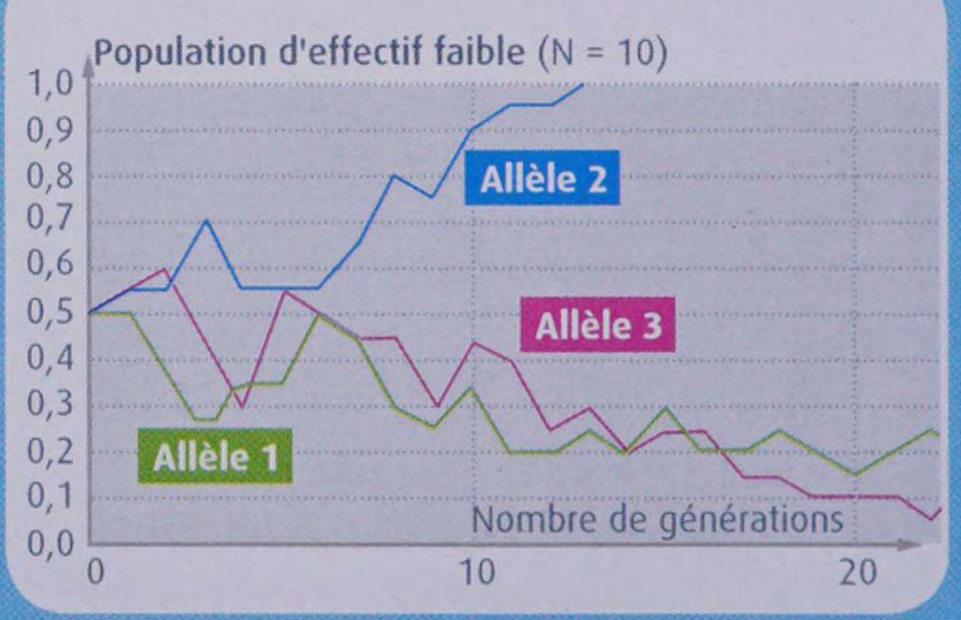
2. Comment se forment de nouvelles espèces ?

Deux individus de l'espèce «souris à abajoues»

Fréquence de deux allèles contrôlant la couleur du pelage dans deux populations de souris à abajoues



Simulation de l'évolution de la fréquence de 3 allèles au cours du temps



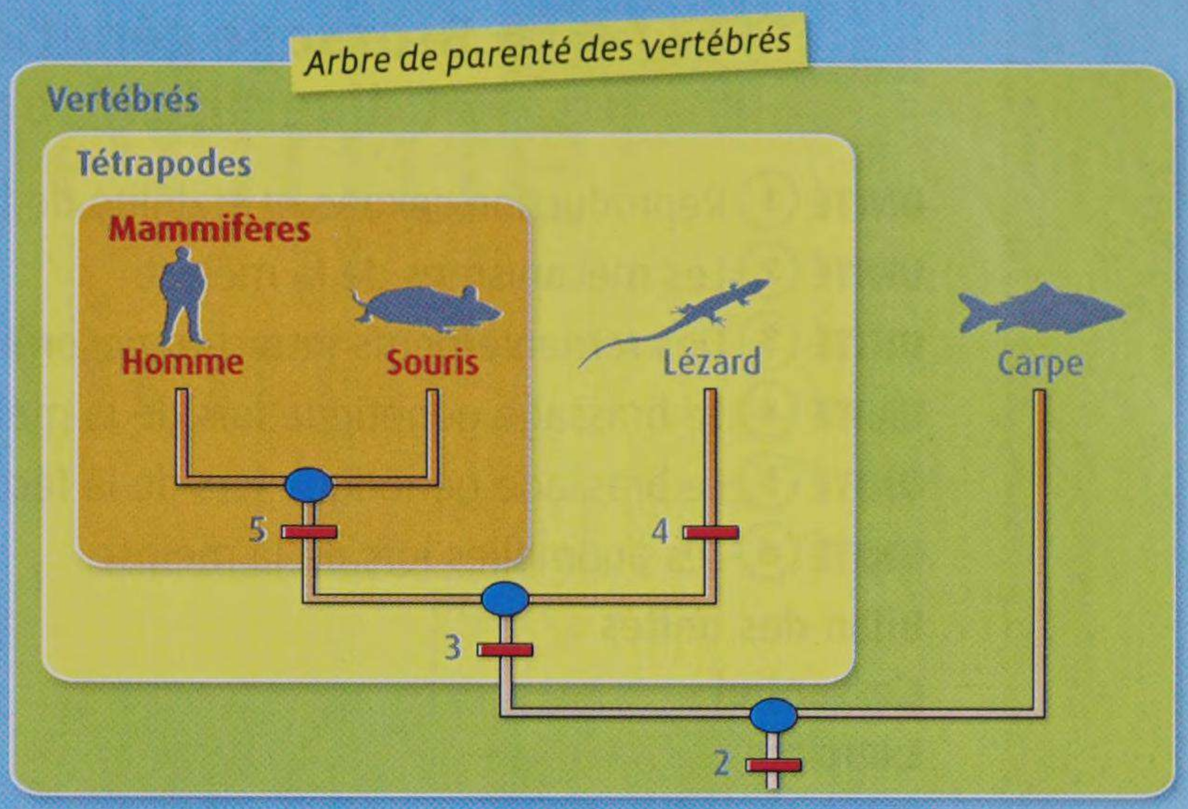
Dérive génétique : variation au hasard (aléatoire) de la fréquence des allèles dans une population. Elle est surtout une conséquence de la reproduction : seuls certains allèles sont transmis aux descendants.
Population : ensemble d'individus appartenant à la même espèce et occupant le même territoire géographique.
Sélection naturelle : variation non aléatoire de la fréquence des allèles. Dans un milieu donné, certains allèles confèrent un avantage à ceux qui les portent, qui ont donc plus de chances de se reproduire et de les transmettre.

1. **Comment explique-t-on la variation de la fréquence allélique dans une population ?**
2. **En quoi la diversité allélique au sein d'une espèce favorise-t-elle sa survie ?**
3. **Retrouvez les deux principaux mécanismes qui modifient à long terme la diversité génétique d'une population et sont les moteurs de l'évolution des espèces.**

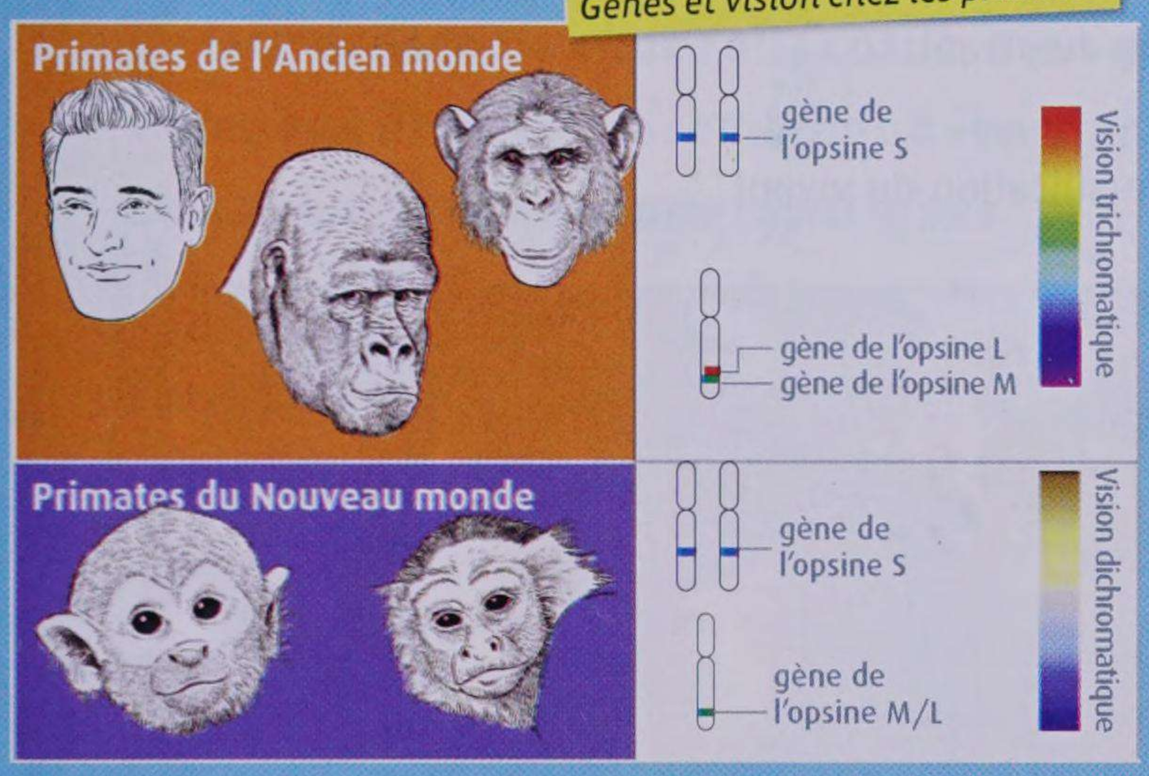
3. Quelle est la place de l'Homme dans l'évolution ?

Squelette de trois vertébrés

Arbre de parenté des vertébrés



Gènes et vision chez les primates



1. **Retrouvez quelques arguments qui étayent la notion d'origine commune des êtres vivants.**
2. **Comment établit-on la parenté entre espèces ?**
3. **Comment l'étude des gènes des pigments rétiniens permet-elle de positionner l'Homme au sein des primates ?**

Ancêtre commun : être vivant hypothétique qui acquiert une innovation évolutive et la lègue à tous ses descendants.
Caractère dérivé : innovation évolutive dérivant d'un caractère ancestral.
Famille multigénique : ensemble de gènes dérivant d'un gène ancestral par duplication et mutations.

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 1

La **mitose** est une division cellulaire qui se déroule en quatre phases : prophase, métaphase, anaphase et télophase. Au cours de l'interphase d'un cycle cellulaire, l'ADN subit une **réplication** semi-conservative qui permet de dupliquer à l'identique la séquence nucléotidique de chaque chromosome. Mais des erreurs aléatoires peuvent apparaître lors de copie de l'ADN : si elles ne sont pas réparées et n'empêchent pas la survie de la cellule, ces **mutations** génèrent de nouvelles versions des gènes, les allèles. Ceux-ci peuvent être à l'origine de l'apparition de nouveaux caractères au fil des générations, ce qui assure une certaine diversité génétique au sein d'une espèce (ou **diversité allélique**).

Dans une **population** donnée, la fréquence allélique varie au cours du temps. Sous la pression de facteurs du milieu (prédation, pollution, etc.), les individus qui possèdent des allèles leurs conférant un avantage, auront plus de chance de survivre et de se reproduire : la fréquence de leurs allèles augmentera au fil des générations. Outre ce processus de **sélection naturelle**, il existe une variation aléatoire de la fréquence allélique au sein d'une population : c'est la **dérive génétique**. La dérive génétique et la sélection naturelle peuvent conduire à la formation de **nouvelles espèces** lorsque les différences génétiques entre populations deviennent importantes.

L'origine commune des êtres vivants est étayée par de multiples arguments comme la cellule, unité structurale du vivant, ou l'ADN, support universel de l'information génétique. De même, la similitude du plan d'organisation au sein d'un groupe d'espèces, suggère qu'ils partagent un **ancêtre commun**. La détermination des liens de parenté entre espèces est fondée sur le partage des **caractères communs** (innovation évolutive). L'Homme est une espèce parmi d'autres. Dans l'étude de la **famille multigénique** des gènes de l'opsine, la présence de trois gènes permet de classer l'Homme au sein des primates trichromates de l'Ancien monde.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Brassage génétique et diversification des génomes 17

UNITÉ 1 Reproduction sexuée et stabilité de l'espèce 18
UNITÉ 2 Les mécanismes de la méiose 20
UNITÉ 3 Des remaniements intrachromosomiques au cours de la méiose 22
UNITÉ 4 Le brassage génétique lors de la méiose 24
UNITÉ 5 Le brassage génétique lors de la fécondation 26
UNITÉ 6 Les anomalies lors de la méiose 28
Bilan des unités 30
L'essentiel 34
Exercices 36

CHAPITRE 2 La diversification du vivant 39

UNITÉ 1 Modifications du développement et diversification du vivant 40
UNITÉ 2 Transferts de gènes entre espèces et diversification du vivant 42
UNITÉ 3 Associations de génomes et diversification du vivant 44
UNITÉ 4 Symbioses et diversification du vivant 46
UNITÉ 5 Diversification des comportements et diversification du vivant 48
Bilan des unités 50
L'essentiel 52
Exercices 54

CHAPITRE 3 De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité 57

UNITÉ 1 Les modifications des populations au cours du temps 58
UNITÉ 2 De l'évolution des populations à l'évolution des espèces 60
UNITÉ 3 La définition d'une espèce 62
Bilan des unités 64
L'essentiel 66
Exercices 68

CHAPITRE 4 Un regard sur l'évolution de l'Homme 71

UNITÉ 1 La diversité actuelle et passée des primates 72
UNITÉ 2 La place de l'Homme parmi les grands primates 74
UNITÉ 3 La comparaison génétique entre Homme et chimpanzés 76
UNITÉ 4 La construction du phénotype des grands primates 78
UNITÉ 5 La définition du genre *Homo* 80
UNITÉ 6 La diversité passée du genre *Homo* 82
UNITÉ 7 Des relations de parenté débattues 84
Bilan des unités 86
L'essentiel 88
Exercices 90
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 92
ATELIERS D'EXPLORATION SCIENCES ACTUALITÉ – SCIENCE IN ENGLISH – HISTOIRE DES SCIENCES – MÉTIER 94

CHAPITRE 1

Brassage génétique et diversification des génomes

Ces trois chatons sont nés du même père et de la même mère : ils sont issus d'une reproduction sexuée. Tous ces petits présentent des caractères typiques de leur espèce : le chat* Felis catus. *Bien qu'ils se ressemblent entre eux et qu'ils ressemblent à leurs parents, ils ne sont pourtant pas identiques.

| Une chatte et ses chatons.

Comment la reproduction sexuée assure-t-elle à la fois la stabilité d'une espèce et la diversité des individus qui la composent ?

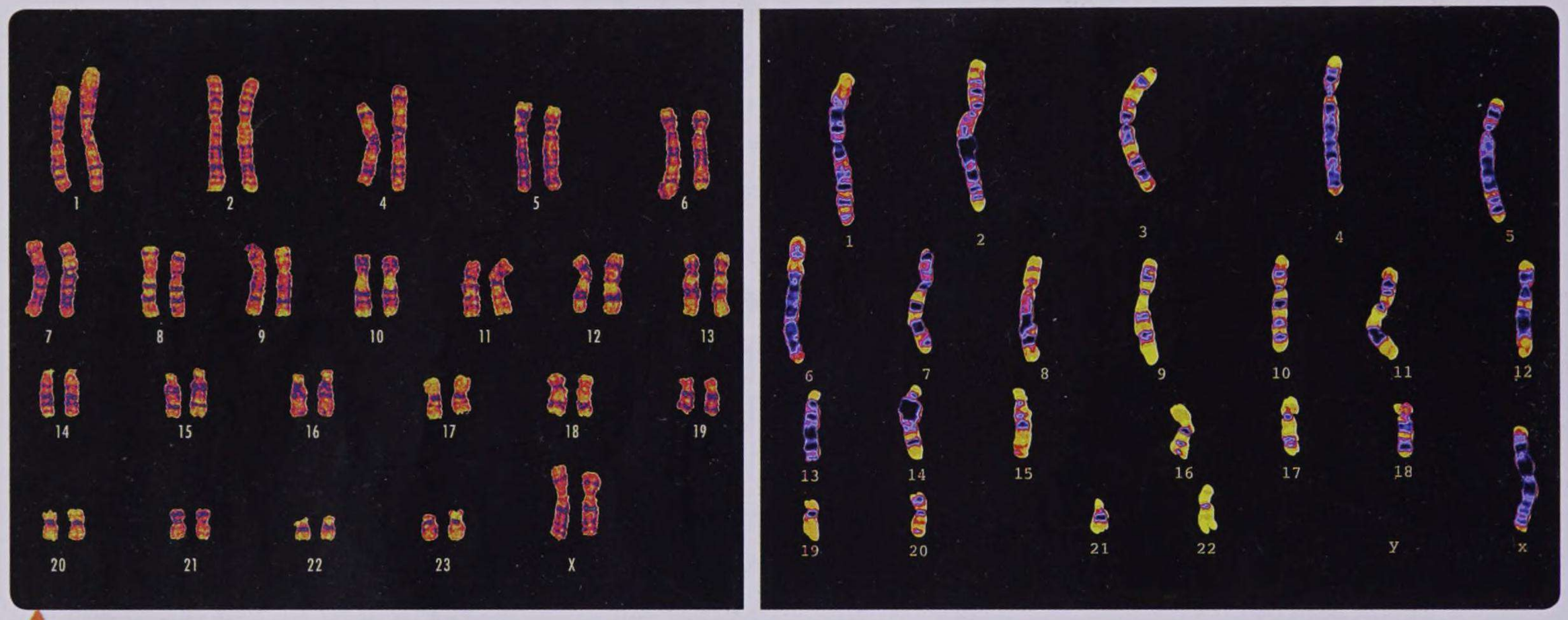
UNITÉ 1

Reproduction sexuée et stabilité de l'espèce

La reproduction sexuée assure la pérennité d'une espèce. Elle nécessite des cellules spécialisées, les cellules reproductrices (ou gamètes) mâles et femelles, qui s'unissent au cours de la fécondation pour donner naissance à un nouvel individu.

Comment les mécanismes de la reproduction sexuée assurent-ils la stabilité d'une espèce ?

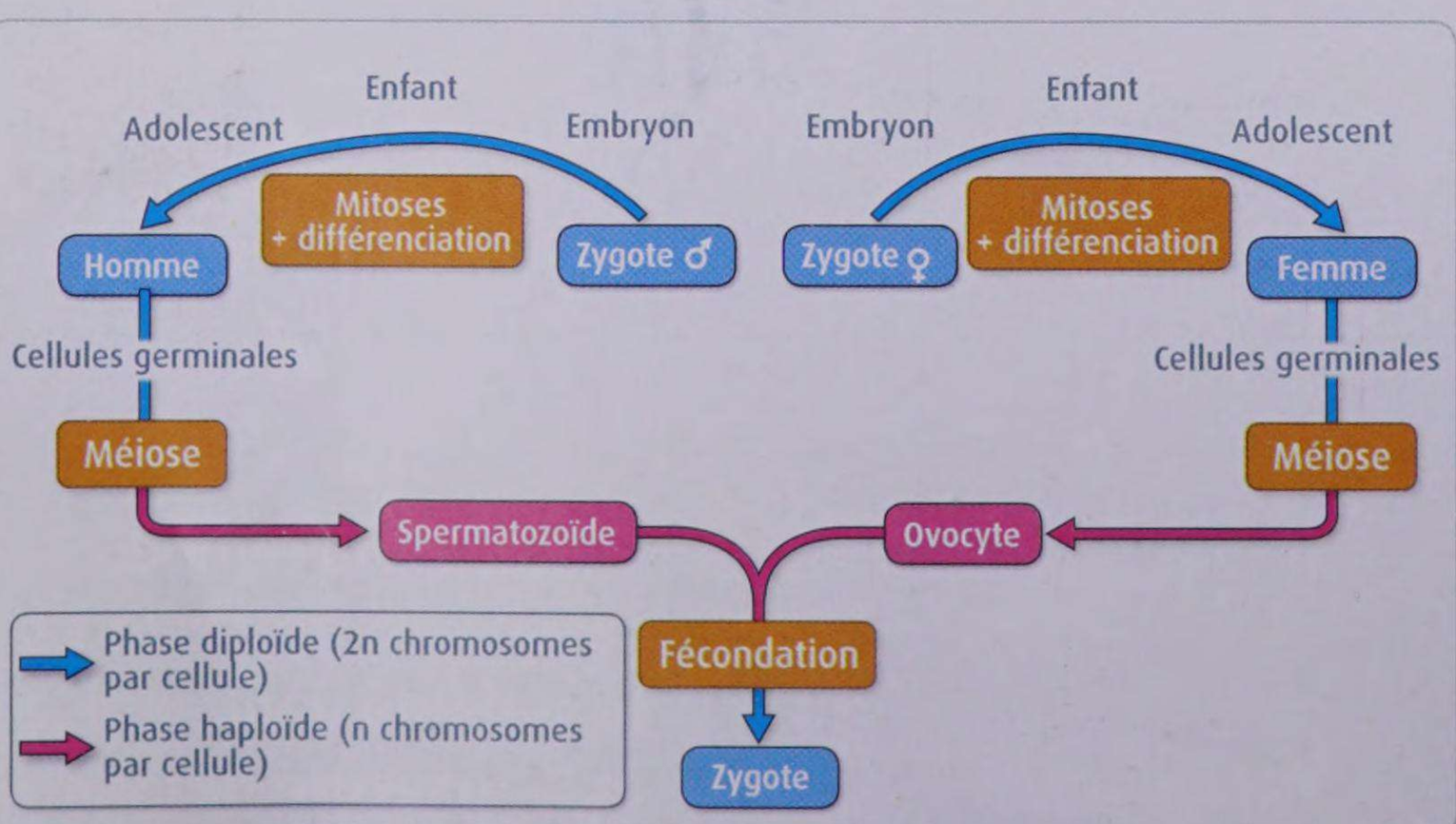
Le cycle de développement de l'espèce humaine



1 Caryotype d'une cellule de peau humaine et d'un gamète humain (ovocyte). La ploïdie d'une cellule caractérise le nombre de lots de chromosomes qu'elle contient : une cellule possédant un seul lot est haploïde (nombre de chromosomes : n) ; une cellule possédant deux lots de chromosomes homologues est diploïde (nombre de chromosomes : 2n).

Espèce	Nombre de chromosomes des cellules somatiques	Nombre de chromosomes des gamètes
Homme	46	23
Chien	78	39
Chat	38	19
Poule	78	39
Ver de terre	36	18
Drosophile	8	4

2 Le nombre de chromosomes présents chez différentes espèces d'animaux. Les cellules germinales sont les gamètes (spermatozoïdes et ovocytes) ainsi que les cellules qui leur donnent naissance. Les autres cellules de l'organisme sont qualifiées de cellules somatiques.



3 Le cycle de développement de l'espèce humaine. Le cycle de développement décrit l'enchaînement des phases de la vie des êtres vivants d'une espèce donnée jusqu'à leur reproduction. Une phase haploïde et une phase diploïde alternent. Chez l'Homme, la phase haploïde est réduite à la formation des cellules reproductrices. La méiose est un processus cellulaire constitué d'une succession de deux divisions particulières, aboutissant à la production des gamètes.

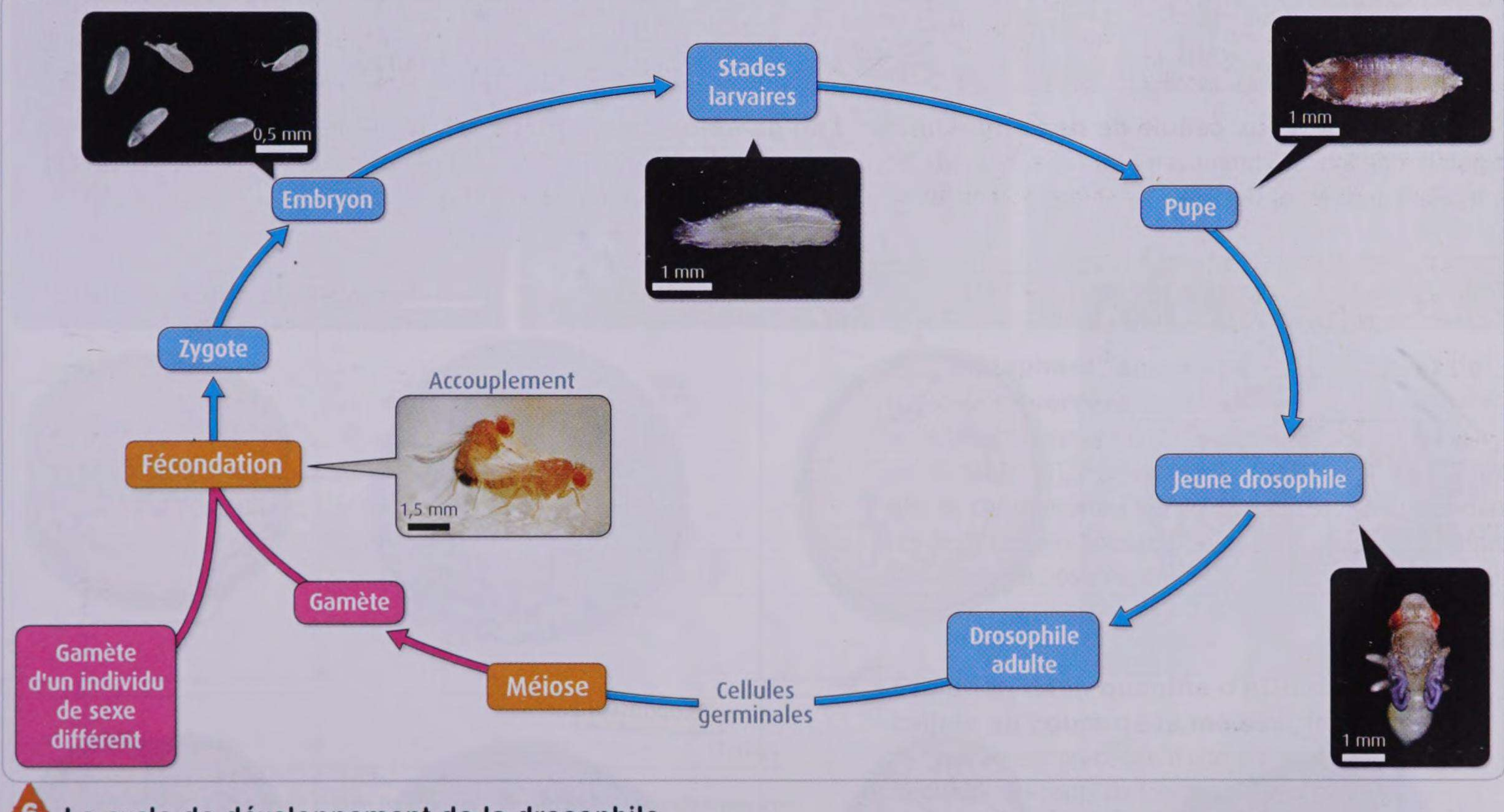
Le cycle de développement de la drosophile

Interview de **Benjamin Loppin**, chercheur en génétique.

La drosophile, petite mouche de deux millimètres de long, est un organisme modèle très utilisé en génétique depuis un siècle. Les premiers travaux sur cet insecte, débutés dès les années 1910, ont notamment permis au biologiste Thomas Morgan de montrer que les chromosomes étaient le support des gènes. La drosophile, toujours à la pointe de la génétique moderne, présente de nombreuses qualités recherchées par les scientifiques : facile et peu coûteuse à élever en laboratoire, elle est en outre très prolifique (100 individus en 15 jours). Il existe aujourd'hui des milliers de souches mutantes qui permettent l'étude pratique de la transmission des caractères héréditaires.

4 La drosophile : un insecte modèle.

5 Caryotype d'une cellule somatique de drosophile femelle. Le caryotype de petite taille (2n = 8 ; chromosomes sexuels : XX chez la femelle, XY chez le mâle) facilite le suivi des chromosomes au cours du cycle de développement de l'animal.



6 Le cycle de développement de la drosophile.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

En vous appuyant sur un schéma théorique de cycle de développement que vous construirez, montrez comment la stabilité du caryotype d'une espèce est assurée au fil des générations.

Pour cela, vous pouvez :
- repérer les points communs entre le cycle de développement de l'Homme et celui de la drosophile **(DOC. 3 ET 6)** ;
- repérer le nombre d'exemplaires de chaque chromosome présent dans les différentes phases (haploïde / diploïde) du cycle de développement d'un animal **(DOC. 1, 2 ET 5)** ;
- préciser les conséquences de la méiose et de la fécondation sur la ploïdie des cellules **(DOC. 3 ET 6)**.

UNITÉ 2

Les mécanismes de la méiose

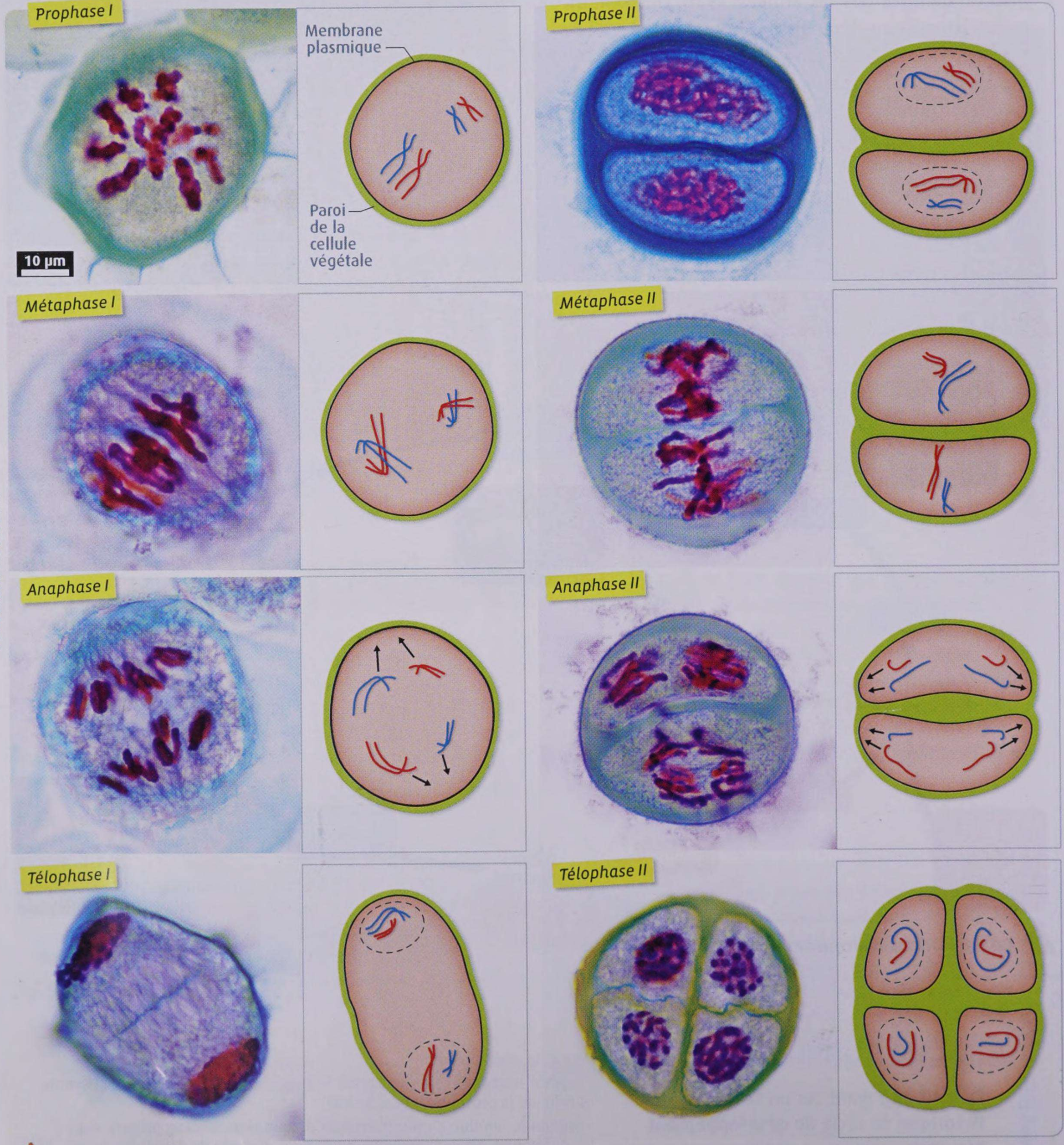
L'alternance méiose-fécondation assure la stabilité du caryotype d'une espèce au fil des générations. La méiose permet de produire, à partir de cellules germinales diploïdes, des gamètes haploïdes.

Comment la méiose permet-elle le passage de cellules diploïdes à des cellules haploïdes ?

Observation du déroulement de la méiose

PREMIÈRE DIVISION

SECONDE DIVISION



1 Les phases de la méiose observées au MO lors de la formation des gamètes mâles du lis. Les photos sont placées dans l'ordre chronologique. Sur le schéma d'interprétation associé à chaque photo, seules deux paires de chromosomes sont figurées. Le déroulement de la méiose dans les cellules animales est identique à celui observé ici.

Quelques événements clés de la méiose

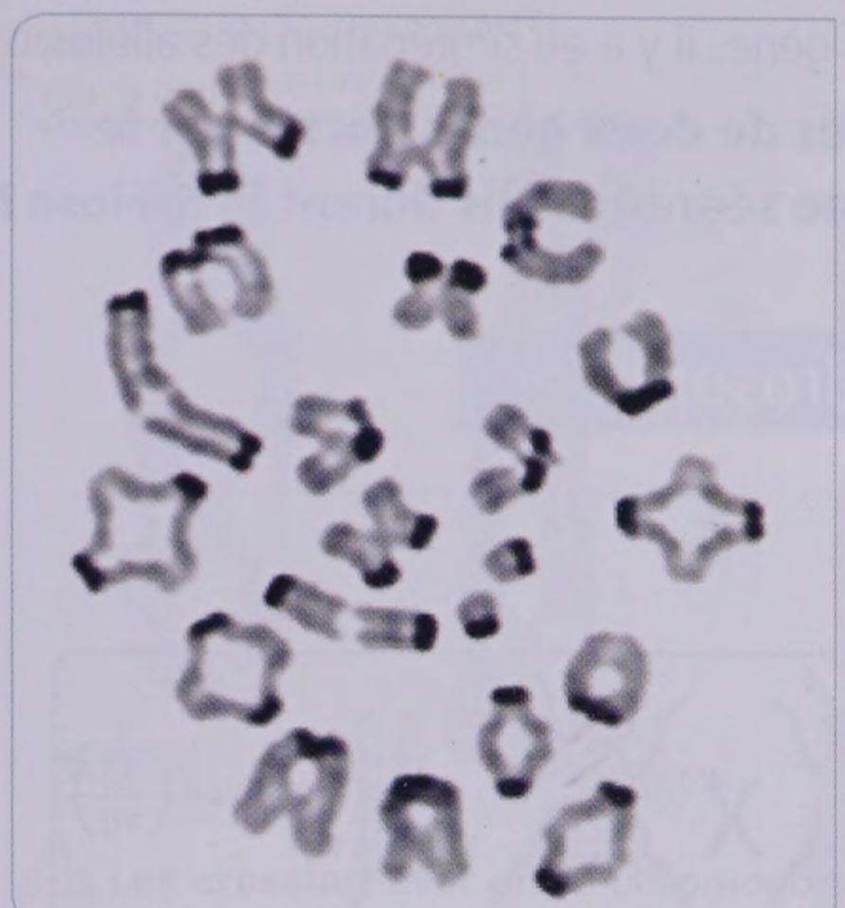
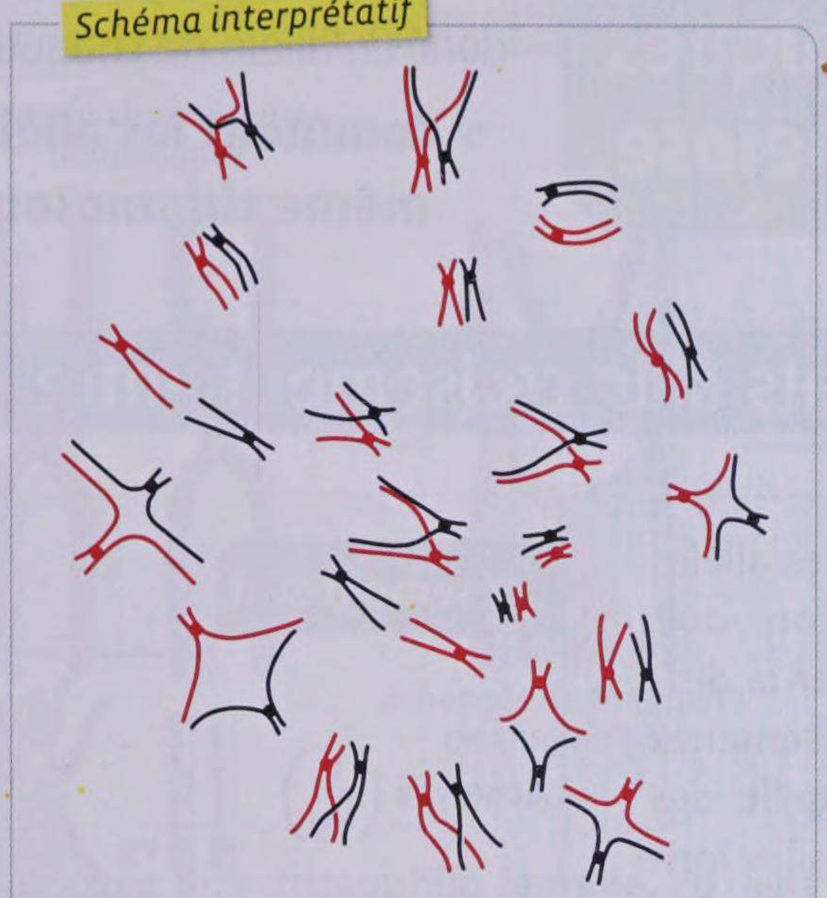
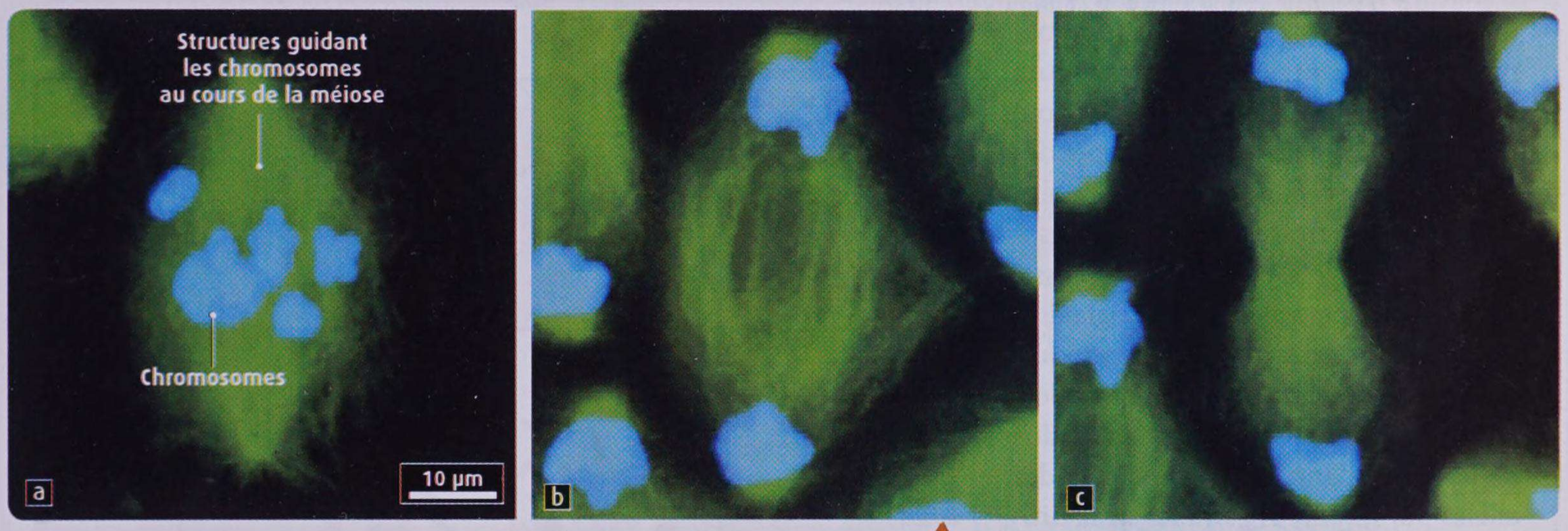
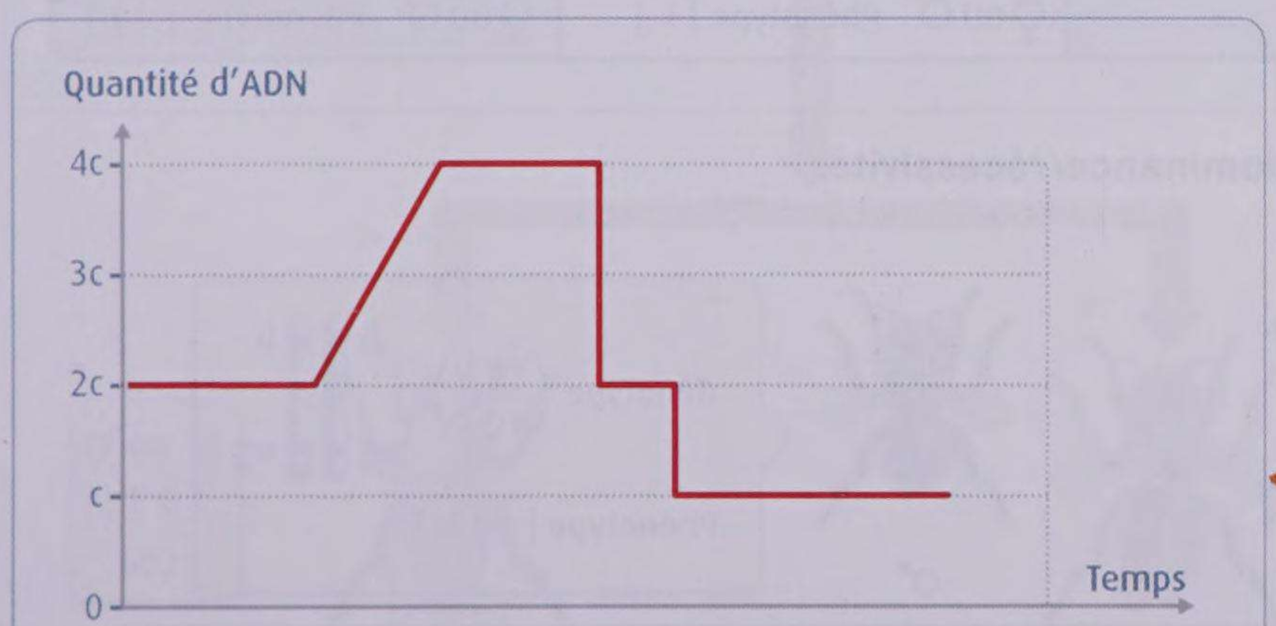


Schéma interprétatif



2 Observation de chromosomes en fin de prophase I de méiose chez la souris. Les 40 chromosomes de la cellule possèdent 2 chromatides et s'associent étroitement par paires de chromosomes homologues. Les centromères (points de jonction des deux chromatides d'un chromosome) apparaissent sous la forme d'un point noir. Chez la souris, ils sont très proches des extrémités des chromosomes.





3 Métaphase, anaphase et télophase I de méiose observées au MO chez le criquet. Après regroupement des chromosomes à l'équateur de la cellule (a), les homologues se séparent (b). Deux lots de chromosomes individuels sont ainsi formés dans les deux cellules filles obtenues (c). À ce stade, chaque chromosome possède encore 2 chromatides.

4 Évolution de la quantité d'ADN dans une cellule au cours de la méiose. Toute division de méiose est précédée d'une phase de réplication de l'ADN, au cours de laquelle le nombre de chromatides des chromosomes passe de 1 à 2.

ACTIVITÉS

1 DOC. 1 À 4. En exploitant les données des doc. 1 à 3, annotez le doc. 4 :
- indiquez, sur chaque partie de la courbe, la quantité de chromosomes présents dans la cellule (n ou 2n), ainsi que le nombre de chromatide(s) par chromosome ;
- placez les termes : réplication de l'ADN, 1re division de méiose, 2e division de méiose.

2 EN CONCLUSION. Résumez les principales étapes de la méiose et expliquez ainsi comment elle assure la formation de cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.

UNITÉ 3

Des remaniements intrachromosomiques au cours de la méiose

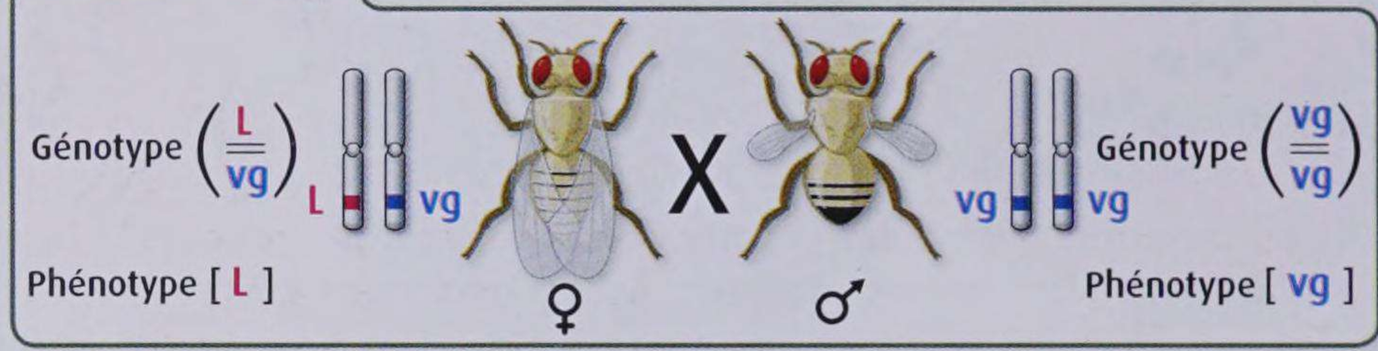
Une cellule somatique contient deux allèles de chaque gène, portés par deux chromosomes homologues. Au terme d'une méiose, chaque gamète contient un chromosome de chaque paire donc un allèle de chaque gène : il y a eu ségrégation des allèles.

Comment les allèles de deux gènes portés par le même chromosome ségrègent-ils durant la méiose ?

Analyser les résultats d'un croisement entre drosophiles

Pour étudier la ségrégation des allèles chez un animal diploïde, on doit croiser des individus et étudier la descendance issue de ces croisements. Soit par exemple le gène « taille des ailes » et ses deux allèles : *L* (ailes longues) et *vg* (ailes vestigiales). L'allèle *L* étant dominant et l'allèle *vg* étant récessif, une drosophile hétérozygote pour le gène « taille des ailes » aura un phénotype « ailes longues », noté [L]. Pour connaître le génotype des gamètes émis par cette drosophile, il suffit de la croiser avec une drosophile homozygote pour l'allèle récessif. Son phénotype est « ailes vestigiales », noté [vg]. Cette drosophile ne produisant que des gamètes portant l'allèle récessif, le phénotype des individus de la descendance ne dépend que des allèles portés par les gamètes de la drosophile à tester. Ce croisement est un croisement-test ou test-cross.

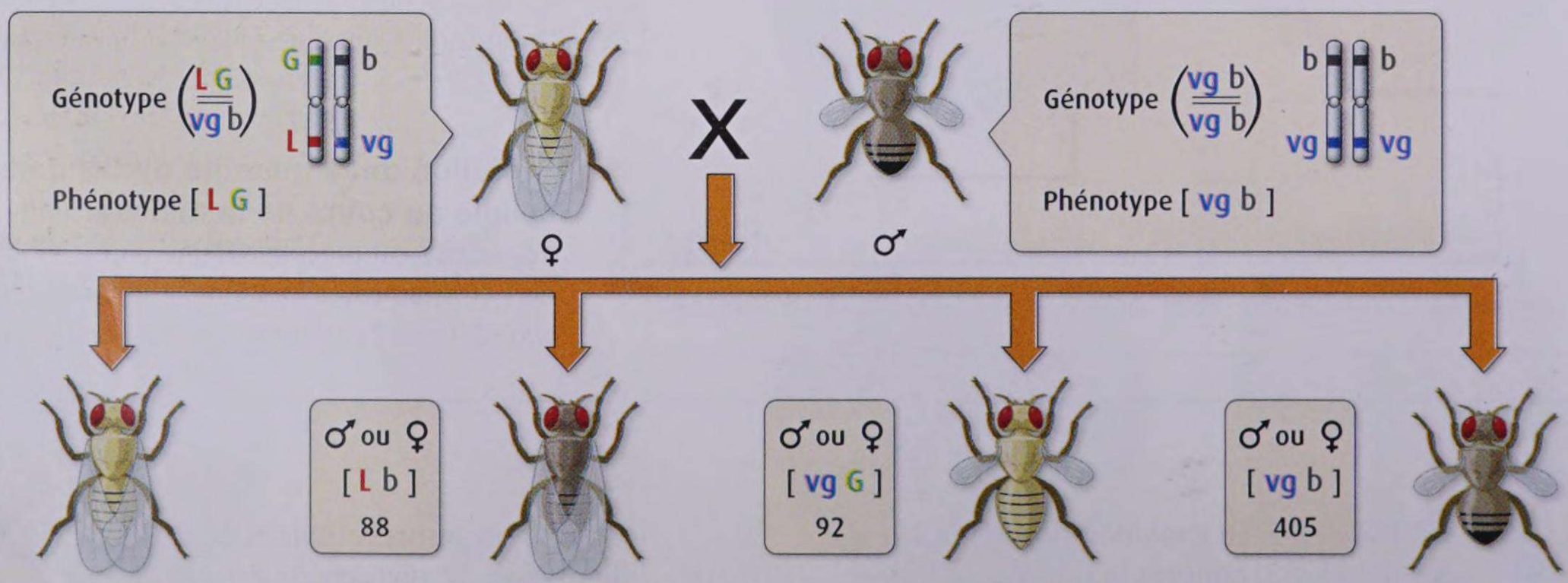
Croisement-test



Échiquier de croisement

Gamètes produits par l'individu (L//vg) \ Gamètes produits par l'individu (vg//vg)	L — Génotype (L//vg)	vg — Génotype (vg//vg)
vg — Génotype (vg)	♀ ou ♂ Génotype (L//vg) Phénotype [L]	♀ ou ♂ Génotype (vg//vg) Phénotype [vg]

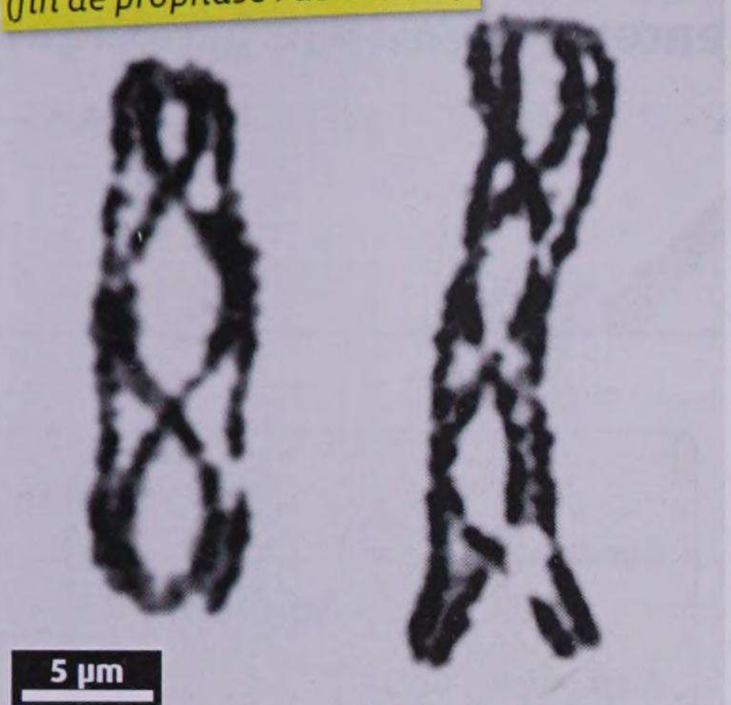
1 Croisement-test (« test-cross ») et notion de dominance/récessivité.



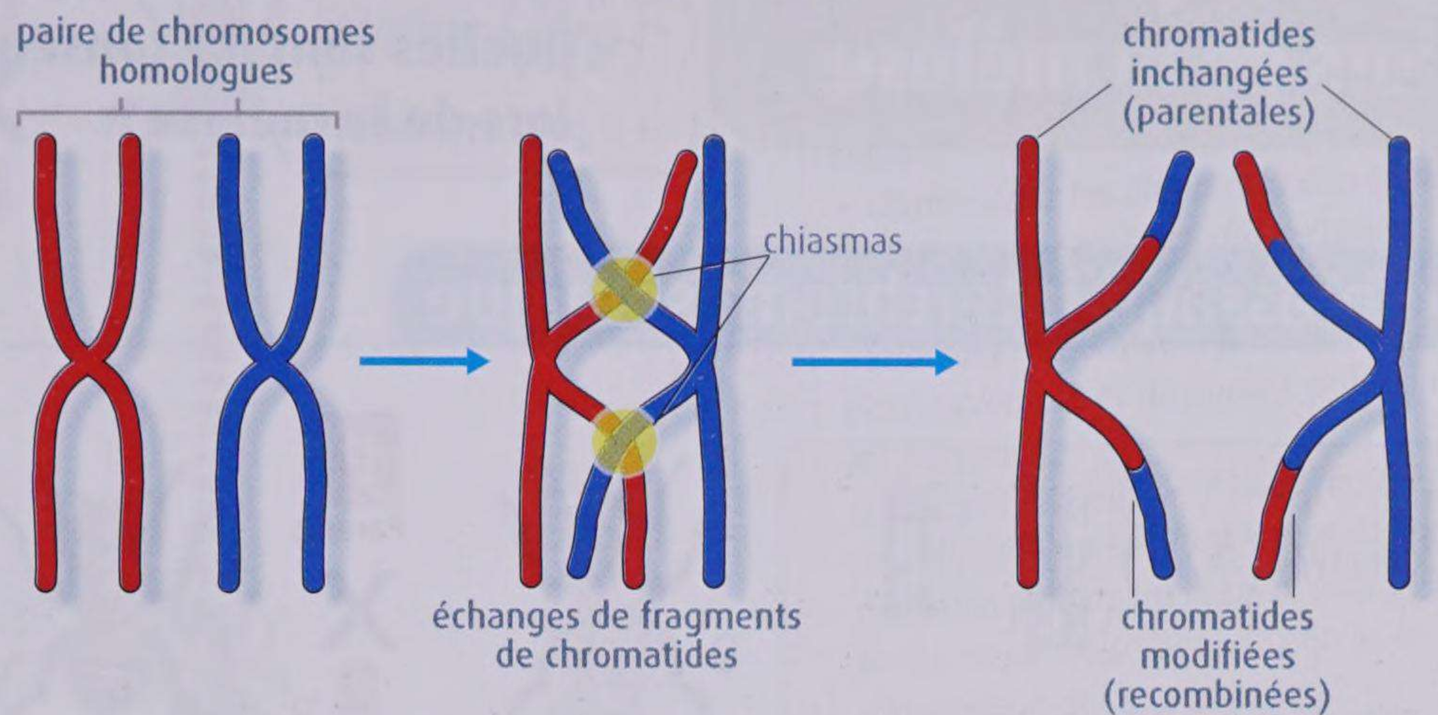
2 La ségrégation des allèles de deux gènes situés sur le même chromosome lors de la méiose chez une drosophile femelle. On considère deux gènes situés sur le chromosome 2 : le gène « taille des ailes » (voir doc. 1) et le gène « couleur du corps » comprenant deux allèles : *G*, dominant (conférant au corps une couleur gris-jaune) et *b*, récessif (conférant, à l'état homozygote, une couleur noire au corps). Les chiffres indiquent les effectifs de drosophiles.

Observer les chromosomes lors de la première division de méiose

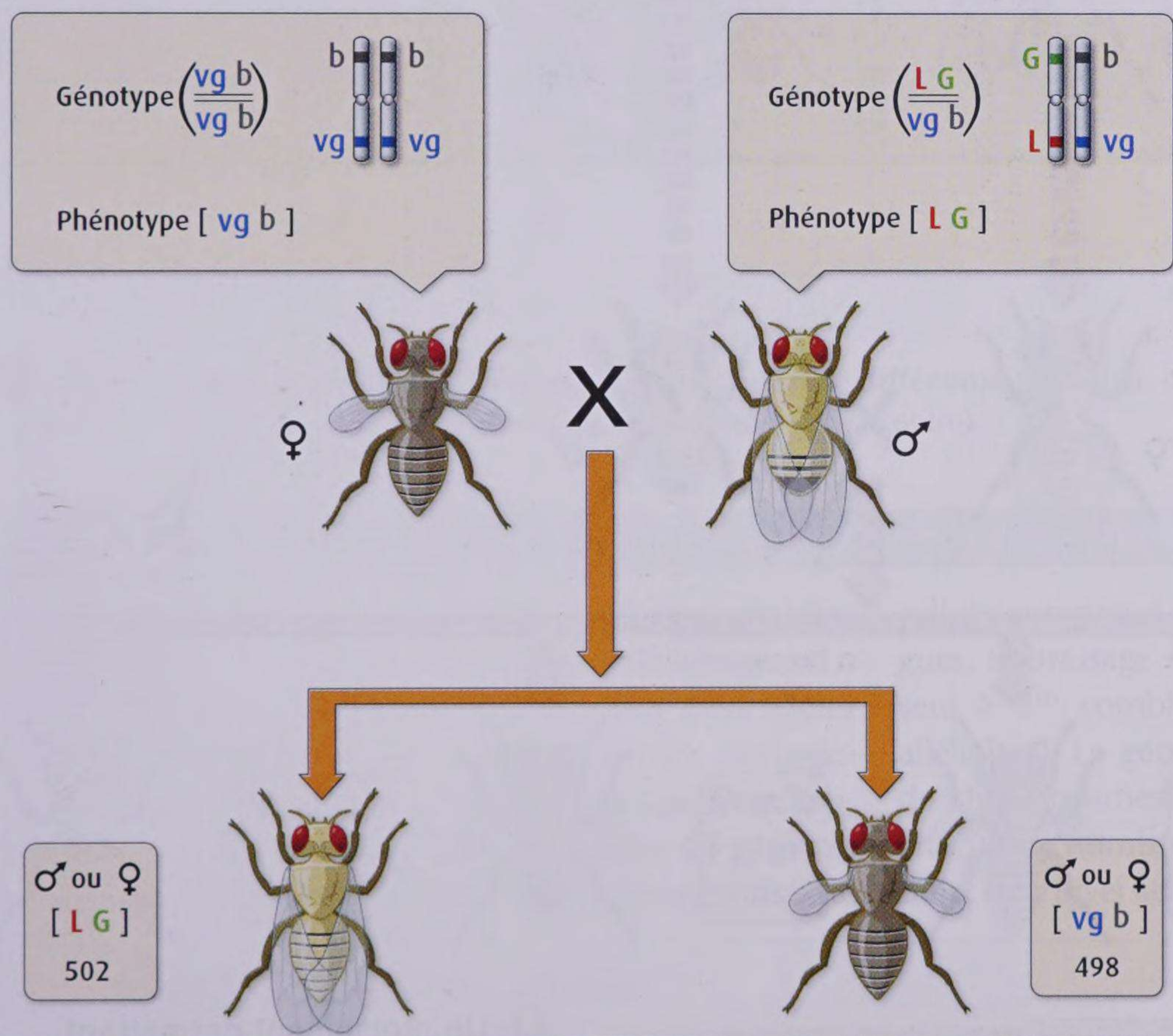
Observation de chiasmas au MET (fin de prophase I de méiose)



Origines et conséquences d'un chiasma



3 Les crossing-over entre chromosomes chez une drosophile femelle. Au cours de la prophase de la première division de méiose, les chromosomes homologues, étroitement appariés, laissent apparaître des figures en forme de X, appelées chiasmas, au niveau desquelles les chromatides s'enchevêtrent. Des portions de chromatides peuvent alors s'échanger d'un chromosome à l'autre : c'est le crossing-over (ou enjambement). Chez la drosophile mâle, ces figures ne sont jamais observées.



4 La ségrégation des allèles de deux gènes situés sur le même chromosome lors de la méiose chez une drosophile mâle.
On réalise le même croisement que celui présenté dans le doc. 2, mais en inversant mâle et femelle.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** D'après vos connaissances, indiquez le génotype attendu des gamètes produits par la drosophile hétérozygote (doc. 2) et le résultat attendu du croisement réalisé (doc. 2).

2 **DOC. 1 ET 2.** Analysez le résultat du croisement pour déterminer le génotype des gamètes réellement produits par la drosophile hétérozygote (doc. 2).

3 **DOC. 3.** Proposez une hypothèse pour expliquer le résultat précédent.

4 **DOC. 3 ET 4.** Éprouvez votre hypothèse.

5 **EN CONCLUSION.** Expliquez comment les allèles de deux gènes situés sur un même chromosome se répartissent dans les cellules filles au cours de la méiose.

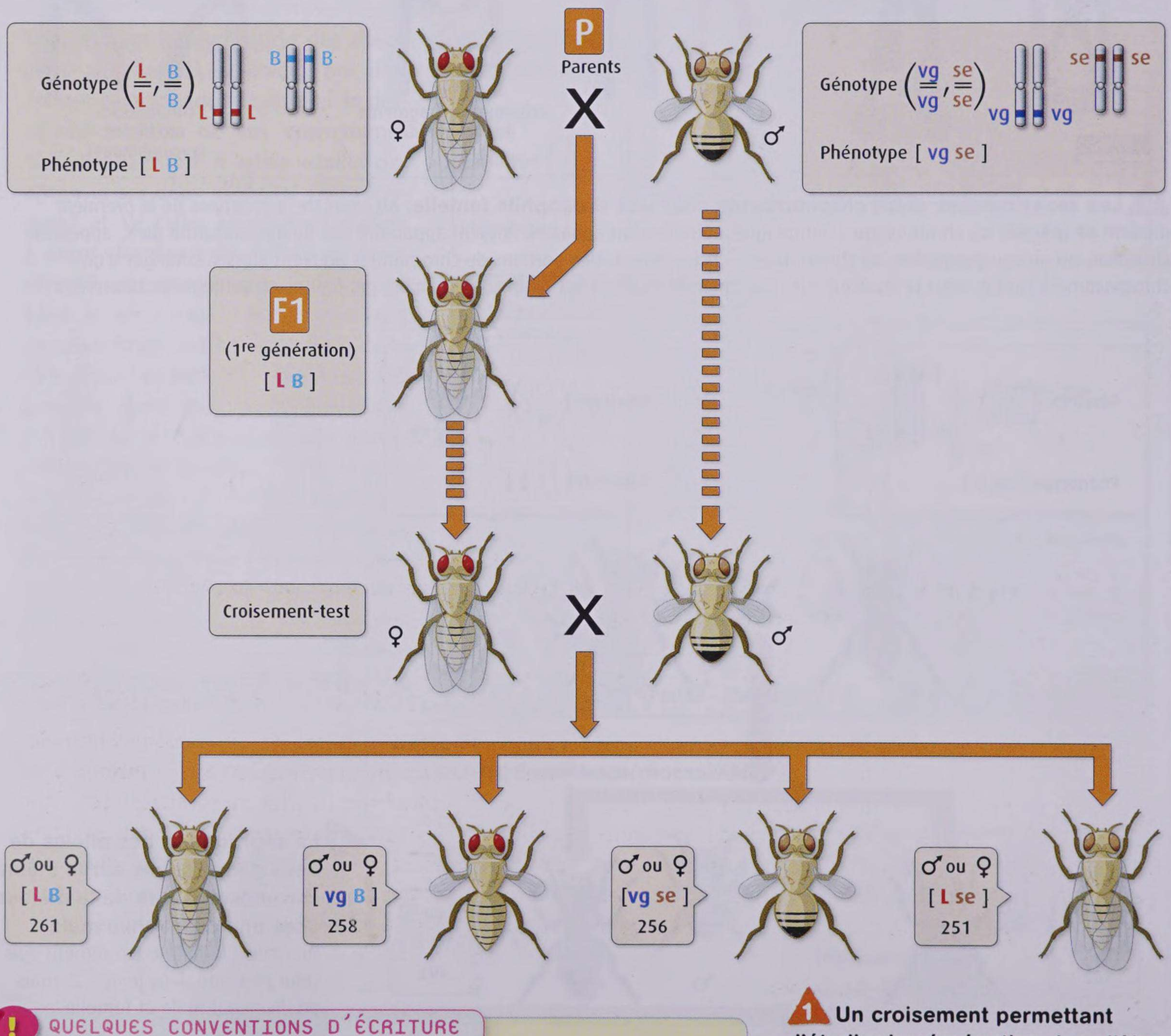
UNITÉ 4

Le brassage génétique lors de la méiose

Les crossing-over créent de nouvelles combinaisons des allèles des gènes d'un même chromosome. Pour les gènes sur des chromosomes différents, d'autres processus produisent de nouvelles combinaisons alléliques. La méiose est ainsi associée à un brassage génétique.

Quelles sont les conséquences du brassage génétique lors de la méiose ?

Le brassage interchromosomique



QUELQUES CONVENTIONS D'ÉCRITURE

	Gènes sur le même chromosome	Gènes sur 2 chromosomes différents
Chromosomes	a1 a2 / b1 b2	a1 a2 / c1 c2
Génotype	$\left(\frac{a1\ b1}{a2\ b2}\right)$	$\left(\frac{a1}{a2}, \frac{c1}{c2}\right)$

1 Un croisement permettant d'étudier la ségrégation des allèles des gènes « taille des ailes » et « yeux couleur sepia » chez la drosophile. Le gène « yeux couleur sepia » est situé sur le chromosome 3. Il comprend deux allèles : *B*, dominant (conférant aux yeux une couleur rouge brique) et *se*, récessif (conférant aux yeux, à l'état homozygote, une couleur brun sepia). Les allèles *L* et *vg* du gène « taille des ailes » sont décrits doc. 1 p. 22.

Les conséquences génétiques de la méiose

Le croisement

Génotype $\left(\frac{L\ G}{L\ G}, \frac{B}{B}\right)$

Phénotype [L G B]

P

X

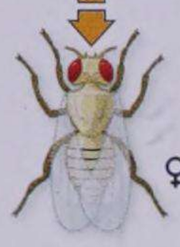
Génotype $\left(\frac{vg\ b}{vg\ b}, \frac{se}{se}\right)$

Phénotype [vg b se]

F1

[L G B]

Croisement-test



X

TP J'UTILISE DROSOFLY

- *Préparez les flacons contenant le milieu de culture.*
- *Commandez les différentes drosophiles.*
- *Sélectionnez les individus à croiser.*
- *Pour chaque croisement :*

– Effectuez un saut de 4 jours (temps d'accouplement et de ponte), puis éliminez les parents.

– Effectuez un saut de 7 jours (fin du développement des larves puis des pupes) puis sélectionnez les descendants pour un nouveau croisement. Observez les descendants sur plusieurs jours, en éliminant au fur et à mesure ceux déjà comptés.

Phénotype et effectif des individus issus du croisement-test

105	109	22	23	25	17	112	102

2 Les résultats d'un croisement impliquant 3 gènes différents : « couleur du corps » (voir doc. 2 p. 22) « taille des ailes » (voir doc. 1 p. 22), « yeux couleur sepia » (voir ci-contre).

Interview de **Évelyne Heyer**, professeur au Muséum national d'Histoire naturelle.

Si l'on considère une cellule qui subit la méiose et dont le génome comprend *n* gènes représentés chacun par deux allèles différents, la combinaison des remaniements intrachromosomiques et du brassage interchromosomique peut théoriquement donner 2^n gamètes dont les combinaisons alléliques sont différentes. Si cette cellule comprend *m* paires de chromosomes homologues, le brassage interchromosomique contribue à lui seul à 2^m combinaisons chromosomiques (et donc alléliques). Le génome humain comprenant 23 paires de chromosomes et quelque 20000 gènes possédant chacun de nombreux allèles, chacun de nous peut produire une diversité quasiment infinie de gamètes...

3 La diversité potentielle des gamètes.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** En vous appuyant sur un schéma, expliquez les résultats obtenus à l'issue du croisement-test.

2 **DOC. 2.** Représentez tous les gamètes produits par les femelles F1 et précisez le déroulement de la méiose ayant conduit à leur formation. Expliquez alors les différences d'effectifs des phénotypes obtenus à l'issue du croisement-test.

3 **DOC. 3.** Calculez combien de gènes possédant deux allèles différents permettent d'obtenir une diversité théorique de gamètes supérieure à la population mondiale.

4 **EN CONCLUSION.** À l'aide de schémas, montrez en quoi la combinaison des remaniements intrachromosomiques et du brassage interchromosomique participe à la diversité des individus d'une espèce.

UNITÉ 5

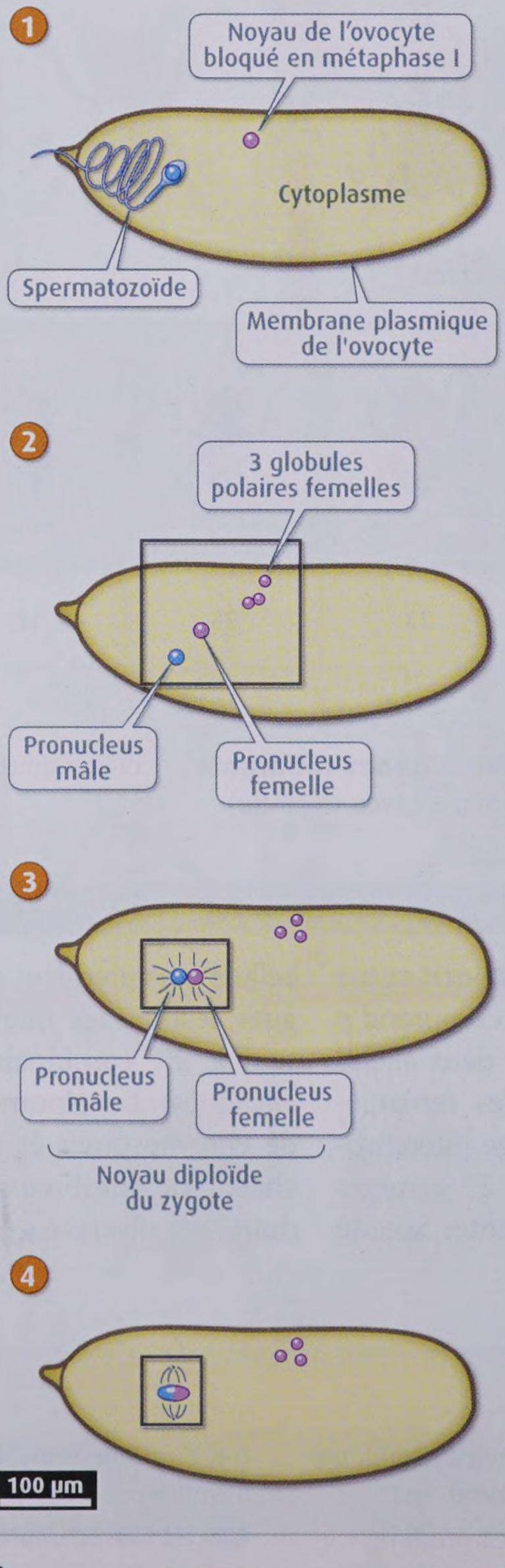
Le brassage génétique lors de la fécondation

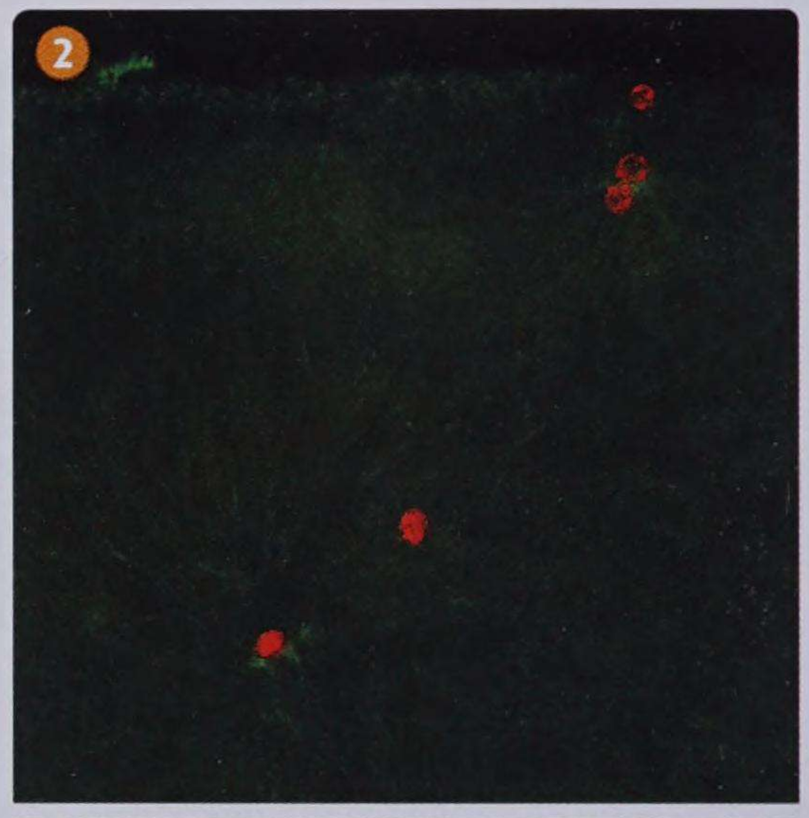
Le brassage génétique réalisé durant la méiose produit une grande diversité de gamètes. Lors de la fécondation, les matériels génétiques haploïdes de deux gamètes s'associent pour constituer le matériel génétique diploïde du zygote.

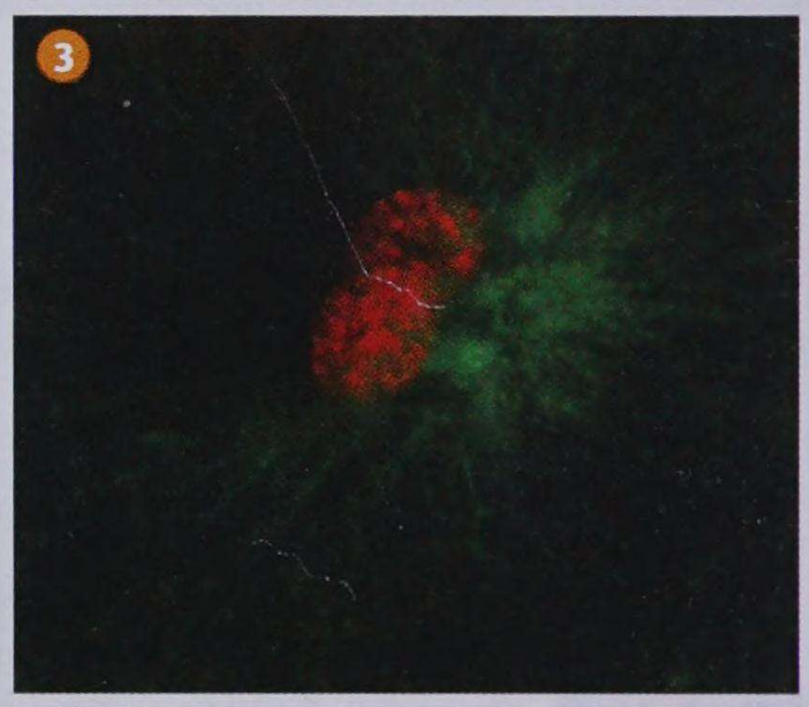
Quelles sont les conséquences de la fécondation sur la diversité génétique ?

L'observation de la fécondation

Le spermatozoïde entier pénètre dans l'ovocyte, alors que celui-ci est bloqué en métaphase I de méiose (**1**). La méiose (dite « méiose femelle ») reprend ensuite. On peut alors observer, à l'intérieur de l'œuf, le noyau haploïde de l'ovocyte (pronucleus femelle), celui du spermatozoïde (pronucleus mâle), ainsi que les noyaux des trois cellules filles de la méiose femelle qui ne participent pas à la fécondation (globules polaires) (**2**). Ces derniers vont dégénérer. Grâce à des protéines formant des câbles (microtubules), les pronuclei migrent dans l'ovocyte et viennent s'apposer l'un à l'autre (**3**). La réunion des deux pronuclei constitue le noyau diploïde du zygote. Leurs matériels génétiques se mêlent alors et participent à la première mitose du futur embryon (**4**).







1 Les étapes de la fécondation chez la drosophile. Les trois photos sont prises au microscope à fluorescence. L'ADN est marqué en rouge, les microtubules (structures guidant le déplacement des chromosomes) sont marqués en vert.

- Chez l'Homme, 80 % des rencontres spermatozoïdes-ovocyte débouchent sur une fécondation, moins de 50 % des embryons s'implantent dans l'utérus (nidation) et 65 % des embryons implantés arrivent à terme.

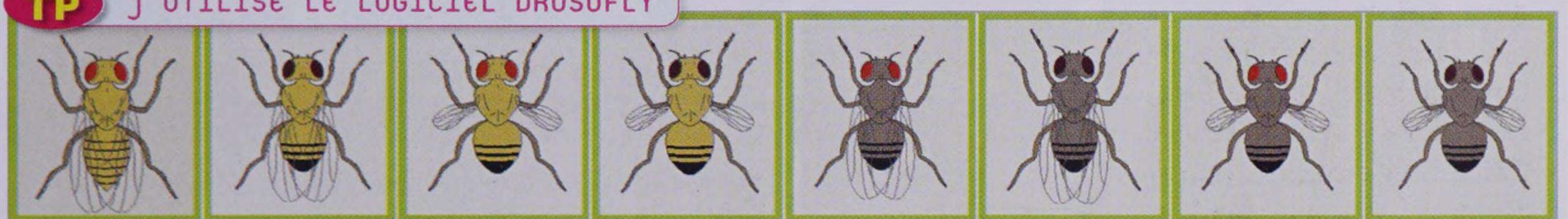
2 Quelques chiffres.

Les conséquences génétiques de la fécondation

Gamètes produits par les parents	vg se	L se	vg B	L B
vg se	vg vg / se se	vg L / se se	vg vg / se B	vg L / se B
L se	L vg / se se	L L / se se	L vg / se B	L L / se B
vg B	vg vg / B se	vg L / B se	vg vg / B B	vg L / B B
L B	L vg / B se	L L / B se	L vg / B B	L L / B B

3 Un croisement entre drosophiles hétérozygotes pour les gènes « taille des ailes » et « yeux couleur sepia ». Le génotype des gamètes des parents (cases grises) et celui des descendants (cases blanches) sont reportés dans l'échiquier de croisement ci-contre. Les allèles sont décrits p. 22 et 24.

TP J'UTILISE LE LOGICIEL DROSOFLY



534	150	41	12	33	8	159	57

4 Le phénotype des descendants d'un croisement entre drosophiles hétérozygotes pour les gènes « taille des ailes », « yeux couleur sepia » et « couleur du corps ». Les allèles sont décrits p. 22 et 24.

Interview de **Frantz Depaulis**, chercheur en génétique de l'évolution.

Si l'on prend en compte seulement quelques gènes des parents, présents sous uniquement 2 allèles différents, on peut assez facilement calculer le nombre potentiel de zygotes différents que la fécondation entre gamètes parentaux pourrait engendrer. Mais notre génome compte environ 20 000 gènes qui, chacun, du fait des mutations survenant dans les cellules germinales, comprennent une multitude d'allèles (ainsi, plus de 1 500 allèles du gène CFTR, impliqué dans la mucoviscidose, ont été identifiés). En conséquence, le nombre de zygotes différents que pourrait potentiellement produire un couple est très élevé, pour ainsi dire infini.

5 La diversité potentielle des zygotes.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Récapitulez les étapes clés de la fécondation.
2. **DOC. 2.** Calculez la proportion d'ovocytes rencontrant des spermatozoïdes qui seront à l'origine d'une naissance.
3. **DOC. 3.** Indiquez le phénotype des descendants du croisement ainsi que la fréquence de chaque phénotype.
4. **DOC. 4.** Dessinez l'échiquier correspondant au croisement effectué et expliquez les différences de fréquence de chaque phénotype.
5. **DOC. 5.** Par le calcul et en vous appuyant sur le doc. 3 p. 25, exprimez la diversité potentielle des zygotes.
6. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les conséquences de la fécondation sur la diversité génétique.

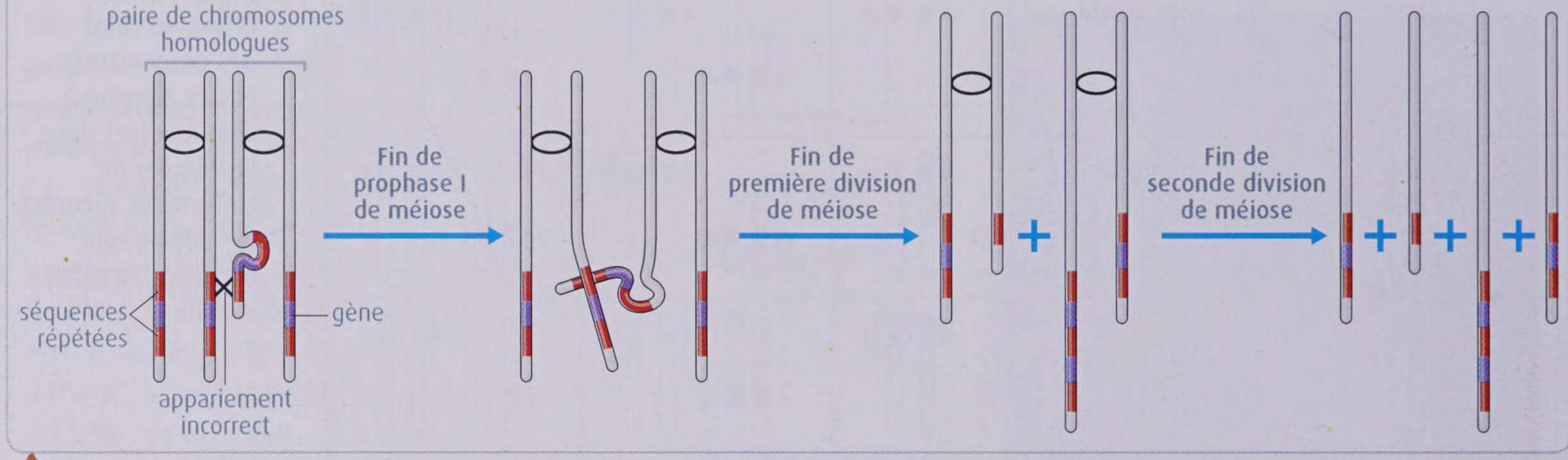
UNITÉ 6

Les anomalies lors de la méiose

La méiose permet, lorsqu'elle est associée à la fécondation, le maintien au fil des générations du caryotype propre à l'espèce. Toutefois, des anomalies peuvent survenir au cours de son déroulement.

Quelle est l'origine des anomalies de la méiose et quelles peuvent en être les conséquences ?

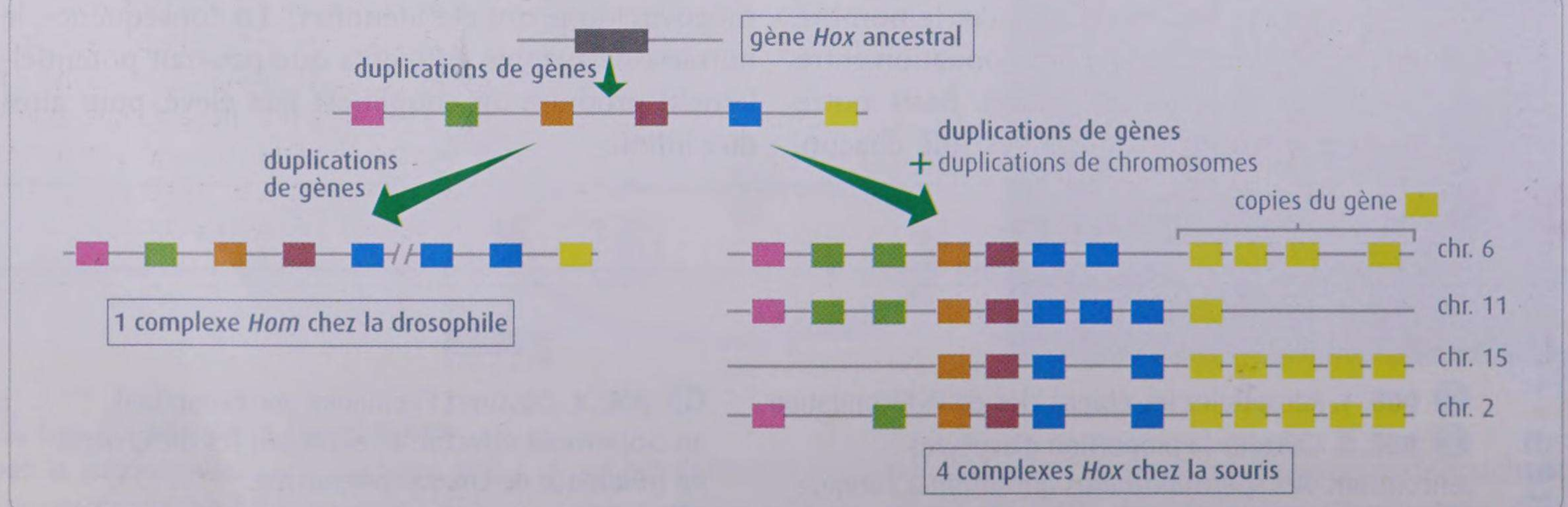
Des anomalies lors des remaniements intrachromosomiques



1 Les crossing-over inégaux. Dans certaines conditions, en prophase I de méiose, un appariement incorrect peut survenir, à l'origine d'un crossing-over qualifié d'inégal.

Interview de **Raquel Tavares**, enseignante-chercheuse en génétique.

Chez l'Homme, près de 38% des gènes sont dupliqués. Les gènes issus d'une duplication forment une famille multigénique. Après la duplication, l'une des deux copies peut conserver sa fonction initiale, tandis que l'autre accumule des mutations et soit devient non-fonctionnelle, soit acquiert une nouvelle fonction. Les deux copies peuvent aussi subir des mutations et permettre, ensemble, le maintien de la fonction initiale. On retrouve ces différentes situations dans la famille multigénique des gènes *Hox*, qui jouent un rôle clé lors du développement embryonnaire des animaux. Ces gènes présentent des séquences extrêmement conservées au sein du règne animal et sont regroupés en complexes. Plusieurs séries de duplications survenues au cours de l'évolution sont sans doute à l'origine des complexes *Hox* des différents animaux. Chacun de ces complexes participe au contrôle du développement d'embryons d'espèces aussi différentes que, par exemple, la souris et la drosophile.



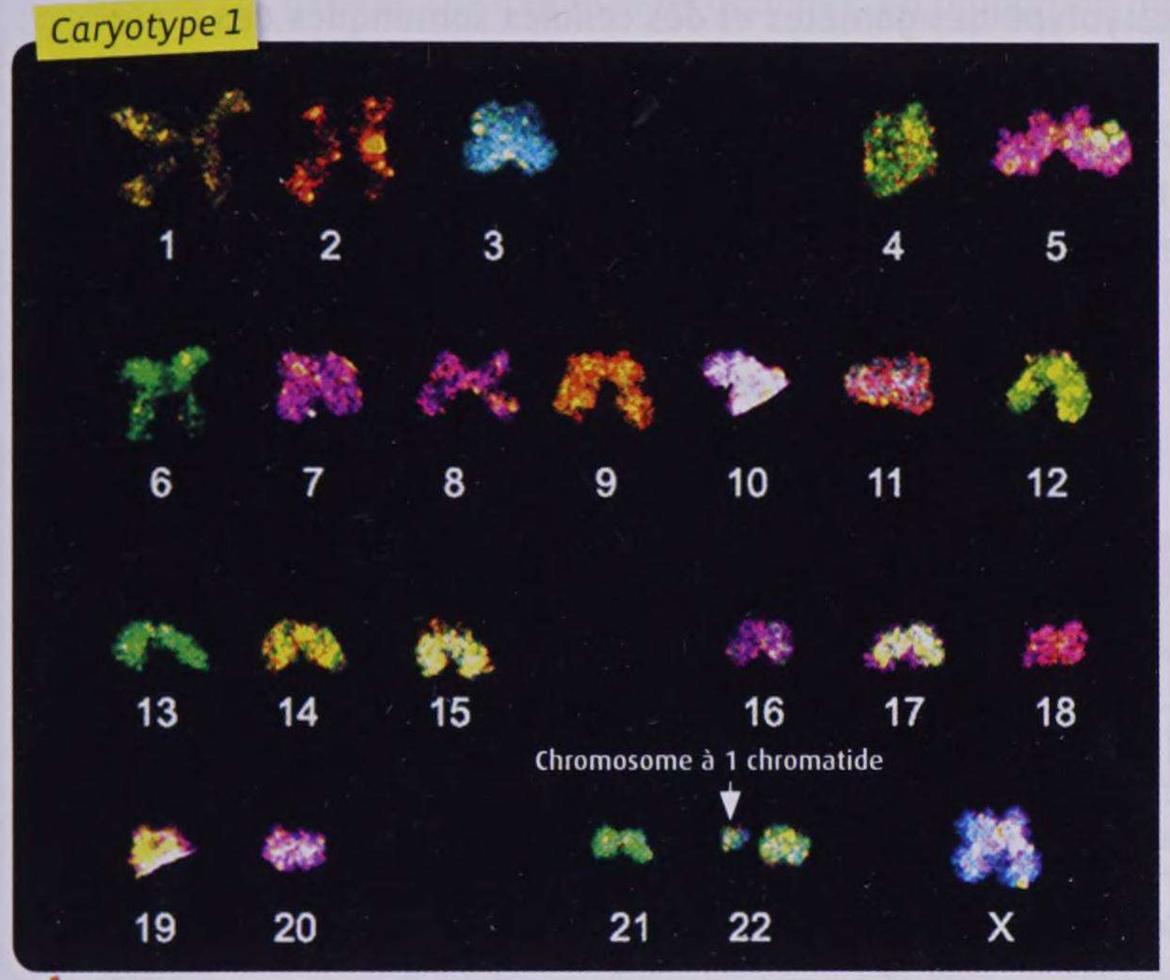
Scénario d'évolution de la famille multigénique des gènes *Hox*.

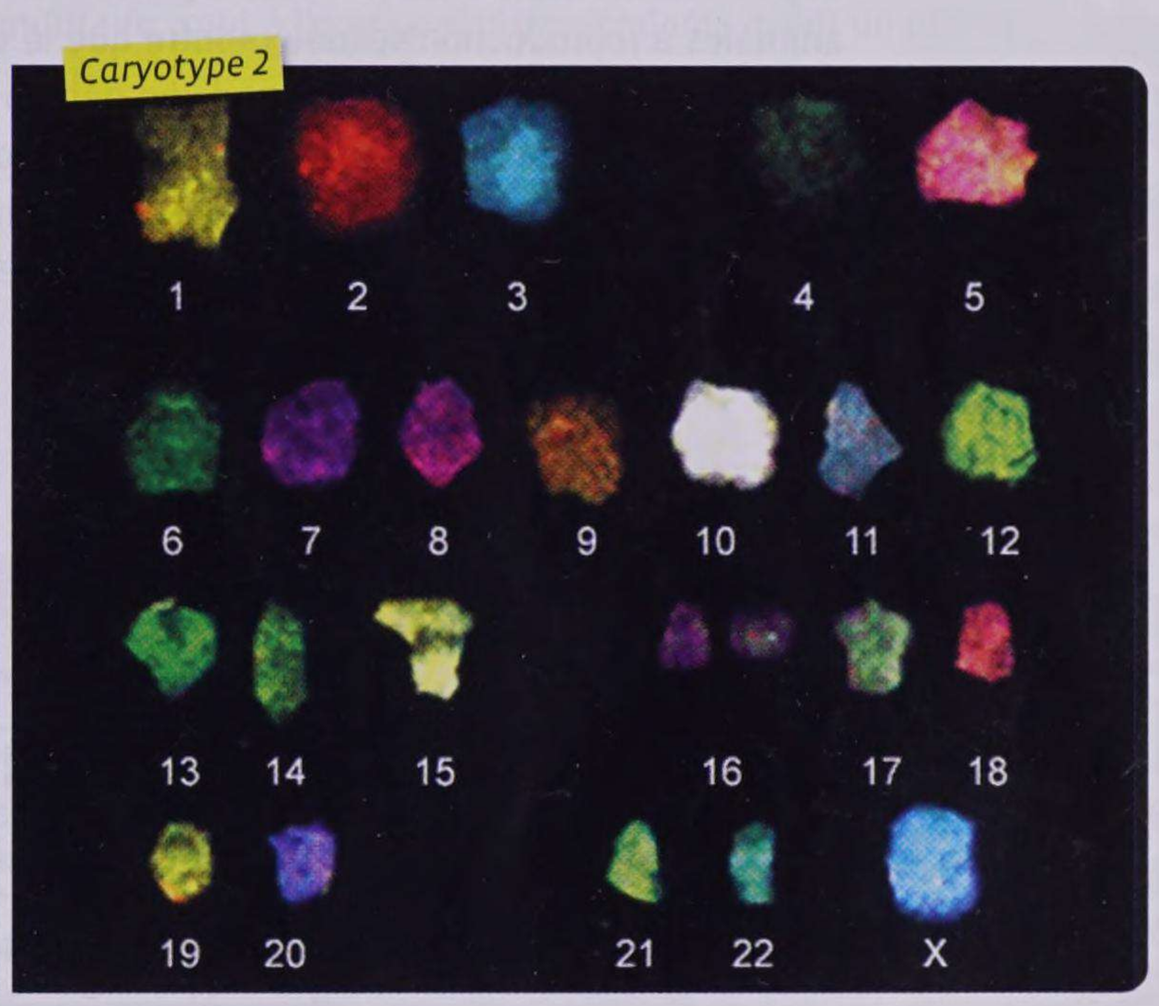
2 Les conséquences des crossing-over inégaux pour l'évolution des génomes.

Des anomalies lors du brassage interchromosomique

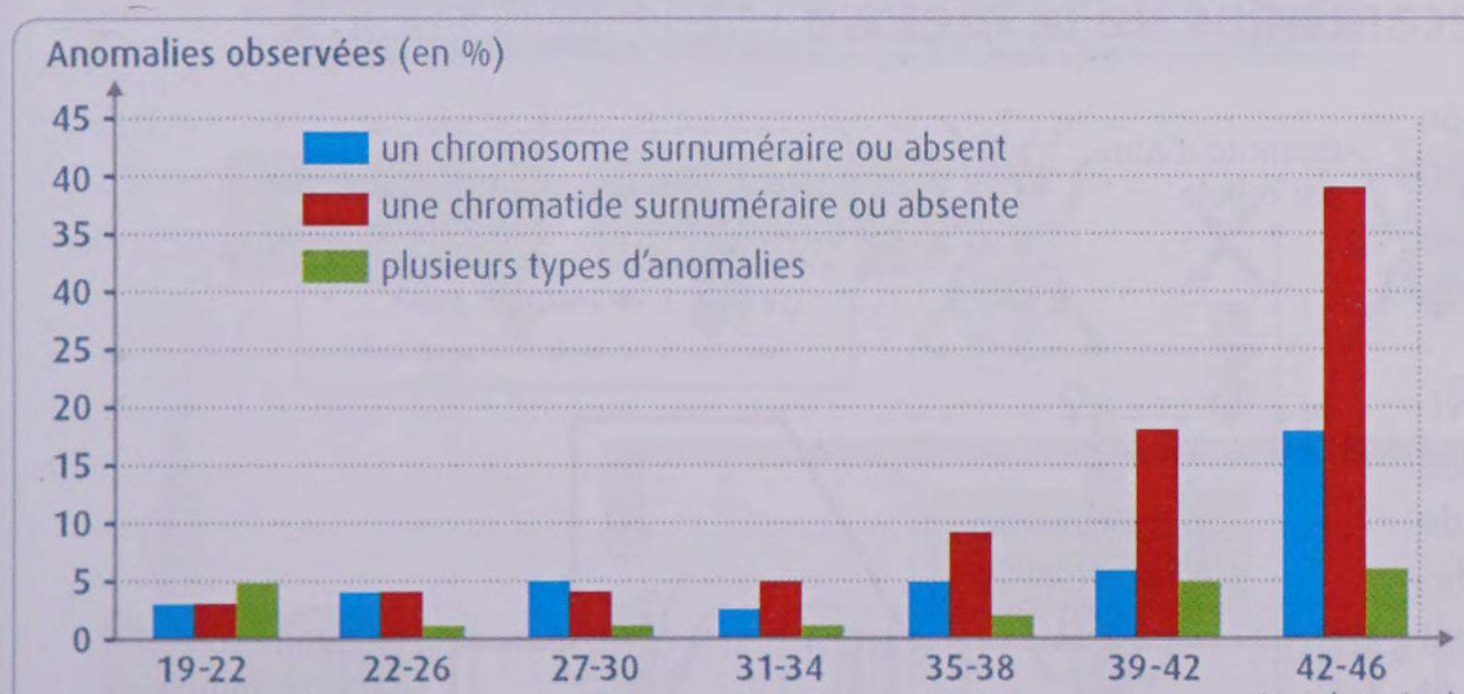
Anomalie chromosomique	Phénotype	Prévalence en France
Trisomie 21	Retard cognitif	1/800 naissances
Trisomie 13	Malformations cérébrales et viscérales, retard psychomoteur très important, faible espérance de vie	1/10 000 naissances
Un seul chromosome sexuel (X0)	Syndrome de Turner : sexe féminin, petite taille, absence de puberté, infertilité	1/ 5 000 naissances

3 Des anomalies du caryotype. En 1958, en observant des caryotypes d'enfants présentant un retard cognitif, un médecin français, J. Lejeune, découvre la présence d'un chromosome surnuméraire au niveau de la 21e paire. Ainsi, pour la première fois, est établi un lien entre une anomalie du caryotype et une pathologie, que l'on rebaptise alors « trisomie 21 ». De nombreuses anomalies du nombre de chromosomes, ou aneuploïdies, ont été identifiées depuis.





4 Deux caryotypes d'ovocytes humains en métaphase II de méiose. Sauf indication contraire, tous les chromosomes ont deux chromatides.



5 Anomalies chromosomiques des ovocytes en métaphase II de méiose en fonction de l'âge maternel. Les caryotypes de près de 1 400 ovocytes humains issus de fécondations *in vitro* n'ayant pas permis le développement d'un zygote ont été analysés. À la naissance, une petite fille possède un stock d'ovocytes bloqués en prophase I. À partir de la puberté, à chaque cycle ovarien, la méiose reprend chez certains ovocytes, dont celui qui sera expulsé hors de l'ovaire à l'ovulation.

ACTIVITÉS

1 **DOC 1.** Déterminez les conséquences du crossing-over inégal sur le génotype des gamètes produits. Indiquez quel élément favorise sa survenue.

2 **DOC. 2 ET 3.** Discutez des conséquences des anomalies de la méiose pour l'espèce et pour l'individu.

3 **DOC. 4.** Indiquez les anomalies de la méiose responsables des caryotypes, et le caryotype des gamètes produits. Que se passera-t-il si ces gamètes sont impliqués dans une fécondation avec des gamètes normaux ?

4 **DOC 5.** Proposez une explication aux résultats observés.

5 **EN CONCLUSION.** Récapitulez l'origine des anomalies chromosomiques, ainsi que leurs conséquences éventuelles pour l'individu et pour l'espèce.

CHAPITRE 1

Brassage génétique et diversification des génomes

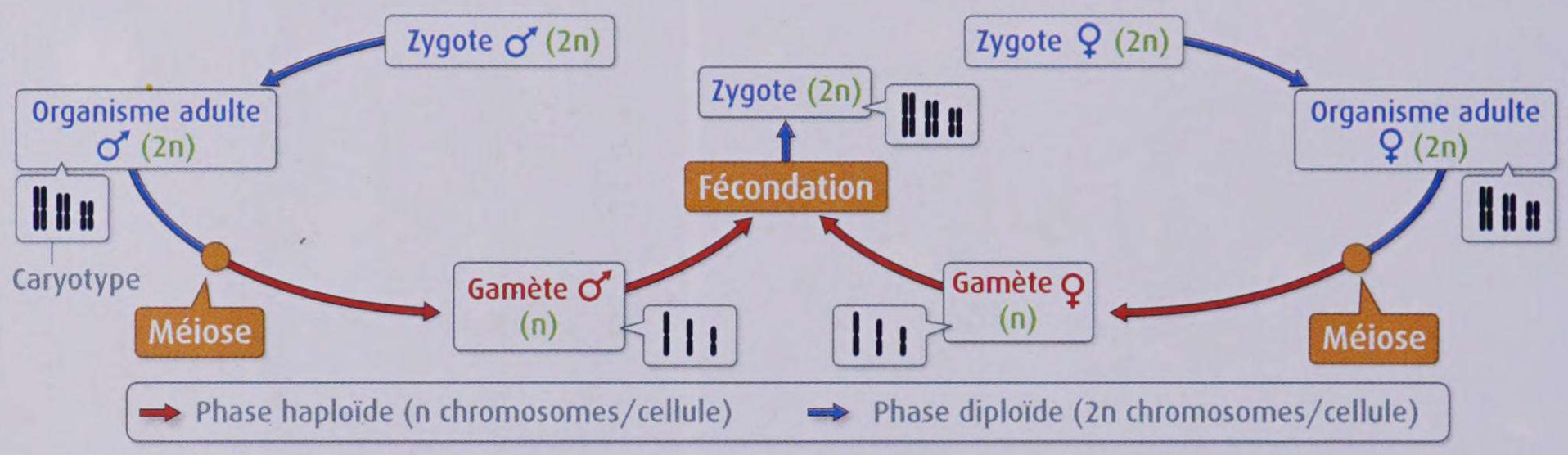
UNITÉS BILAN DES

UNITÉ 1 Reproduction sexuée et stabilité de l'espèce

• Chez les animaux, les cellules somatiques possèdent des paires de chromosomes homologues (= 2n chromosomes) : elles sont dites diploïdes. Les cellules reproductrices, ou gamètes (qui font partie des cellules germinales), possèdent un seul lot de chromosomes (= n chromosomes) : elles sont dites haploïdes. Au sein d'une espèce, le nombre n est identique chez tous les individus.

• Le cycle de développement décrit l'enchaînement des phases de la vie des individus d'une espèce donnée depuis leur naissance jusqu'à leur reproduction. L'étude du cycle de développement de différentes espèces animales à reproduction sexuée montre que le caryotype des gamètes et des cellules somatiques des représentants de l'espèce est maintenu d'une génération à l'autre.

• Cette stabilité du caryotype au fil des générations est assurée par l'alternance, au cours du cycle de développement, de deux processus biologiques complémentaires : la méiose permet de passer de la phase diploïde à la phase haploïde, alors que la fécondation permet de passer de la phase haploïde à la phase diploïde.



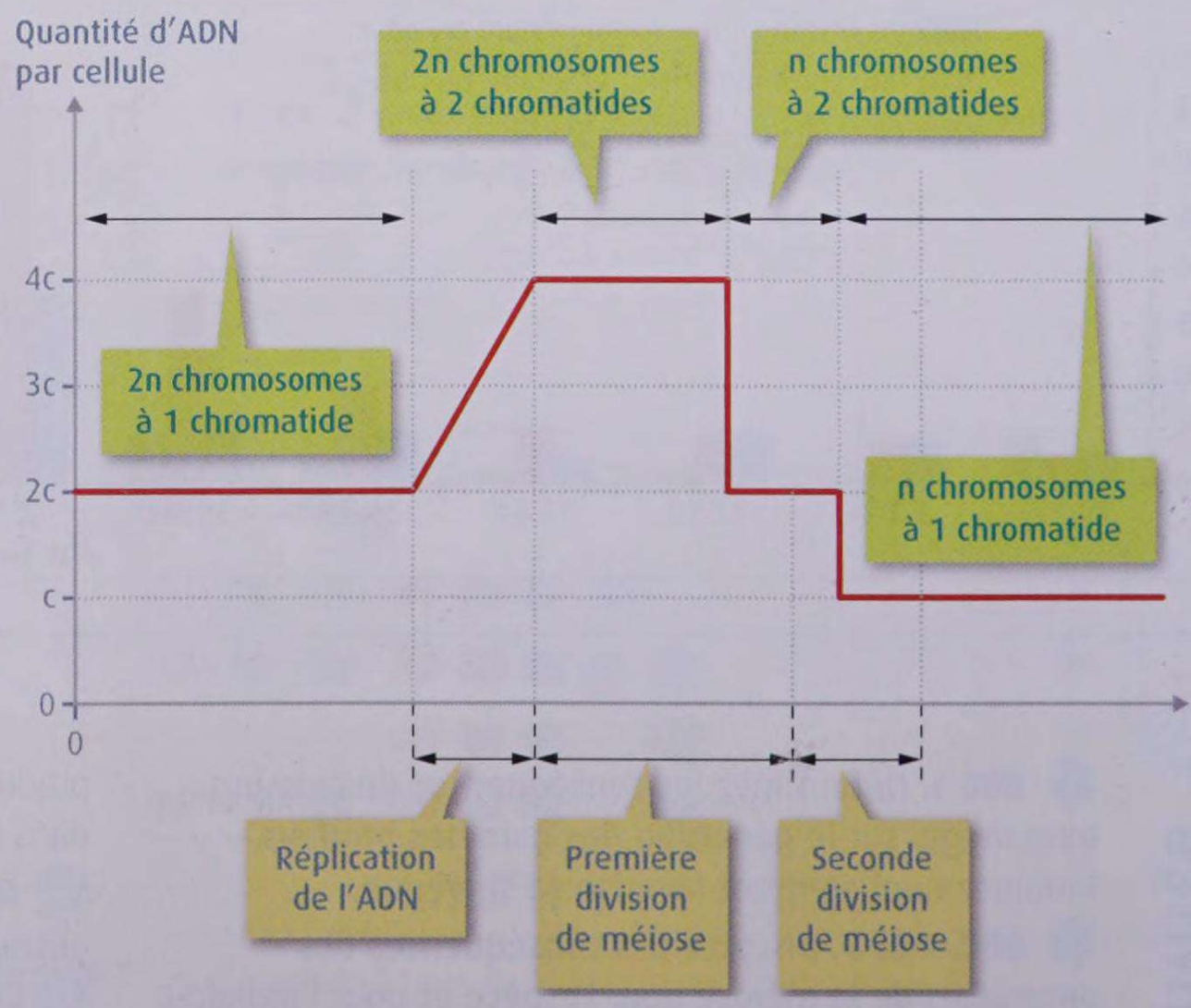
Le cycle de développement d'une espèce animale.

UNITÉ 2 Les mécanismes de la méiose

• La méiose est une succession de deux divisions cellulaires particulières, permettant d'obtenir 4 cellules filles haploïdes à partir d'une cellule mère diploïde.

• Au cours de la première division de méiose, qui est précédée d'une phase de réplication de l'ADN, les chromosomes homologues de chaque paire s'associent étroitement, puis sont séparés et répartis dans deux cellules filles.

• La seconde division de méiose s'engage sans réplication préalable de l'ADN. Elle assure la séparation des chromatides de chaque chromosome et leur répartition dans les quatre cellules filles. Ces dernières seront à l'origine des gamètes.



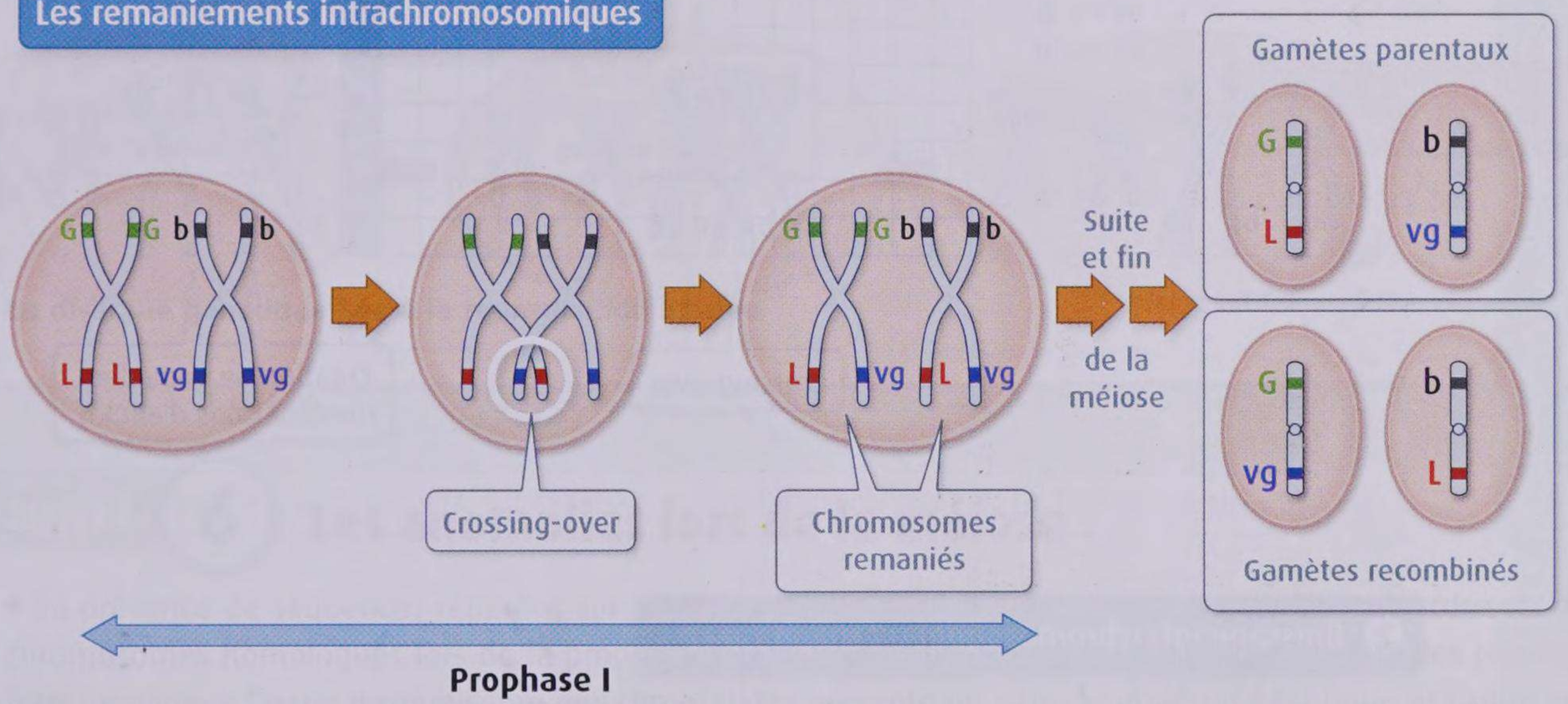
Évolution de la quantité d'ADN et des caractéristiques des chromosomes dans une cellule au cours de la méiose.

UNITÉ 3

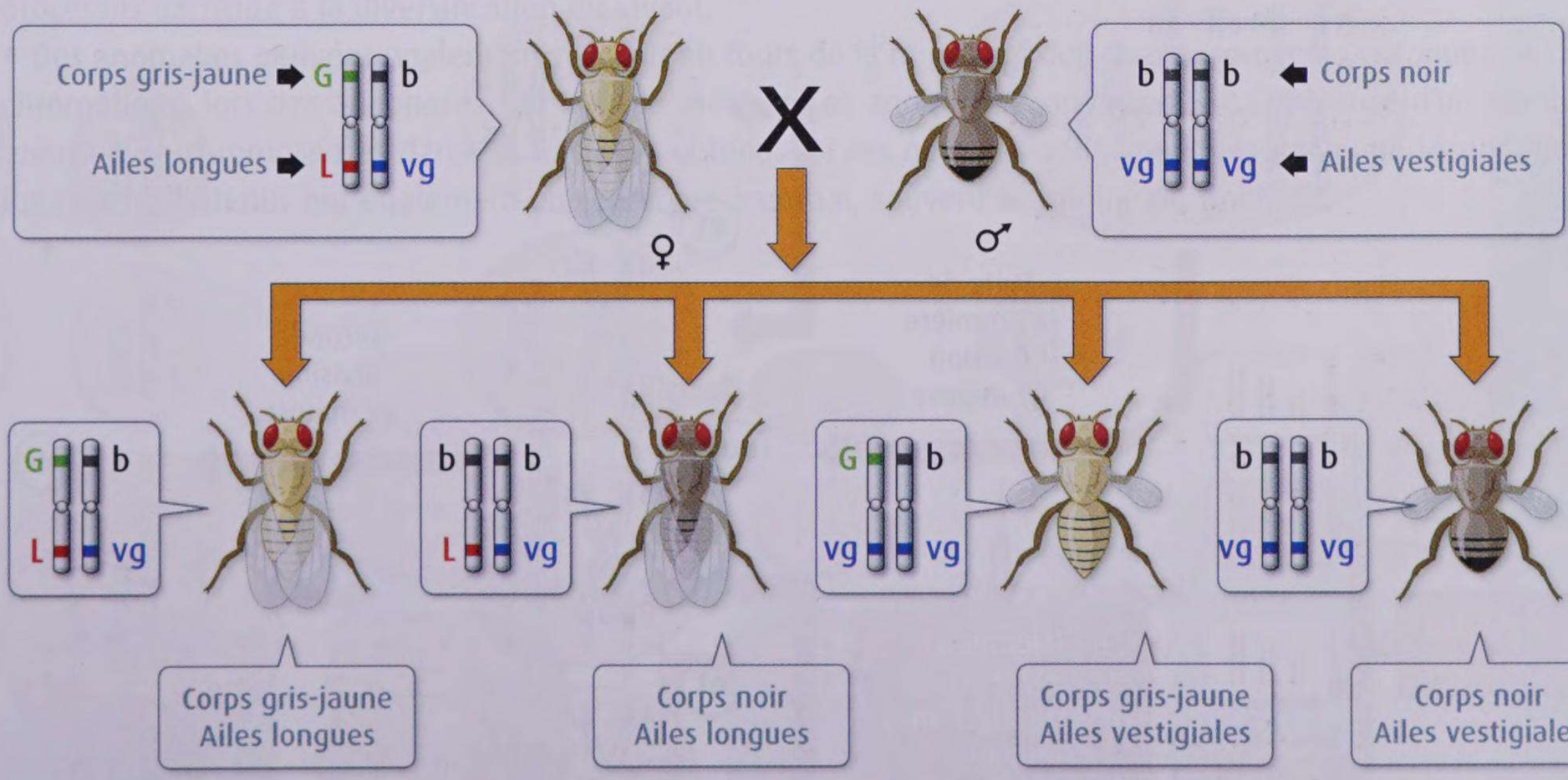
Des remaniements intrachromosomiques au cours de la méiose

- Dans des cellules en prophase I de méiose, on observe les chromosomes homologues étroitement appariés : leurs chromatides s'enchevêtrent et forment des figures appelées chiasmas.
- Au niveau des chiasmas, des échanges de fragments de chromatides peuvent se produire entre chromosomes homologues : c'est le phénomène de crossing-over (ou enjambement). De nouvelles combinaisons d'allèles apparaissent alors sur les chromatides remaniées : on parle de remaniements intrachromosomiques.
- Chez un individu hétérozygote pour deux gènes portés par un même chromosome, les crossing-over sont à l'origine de l'apparition de gamètes dits recombinés. Ces gamètes sont mis en évidence grâce à un croisement-test (croisement entre l'individu étudié et un individu homozygote pour les allèles récessifs des deux gènes). Les gamètes recombinés, en proportion minoritaire, sont à l'origine des descendants ayant un phénotype différent de leurs parents dans le croisement-test.

Les remaniements intrachromosomiques



Mise en évidence des remaniements par croisement-test

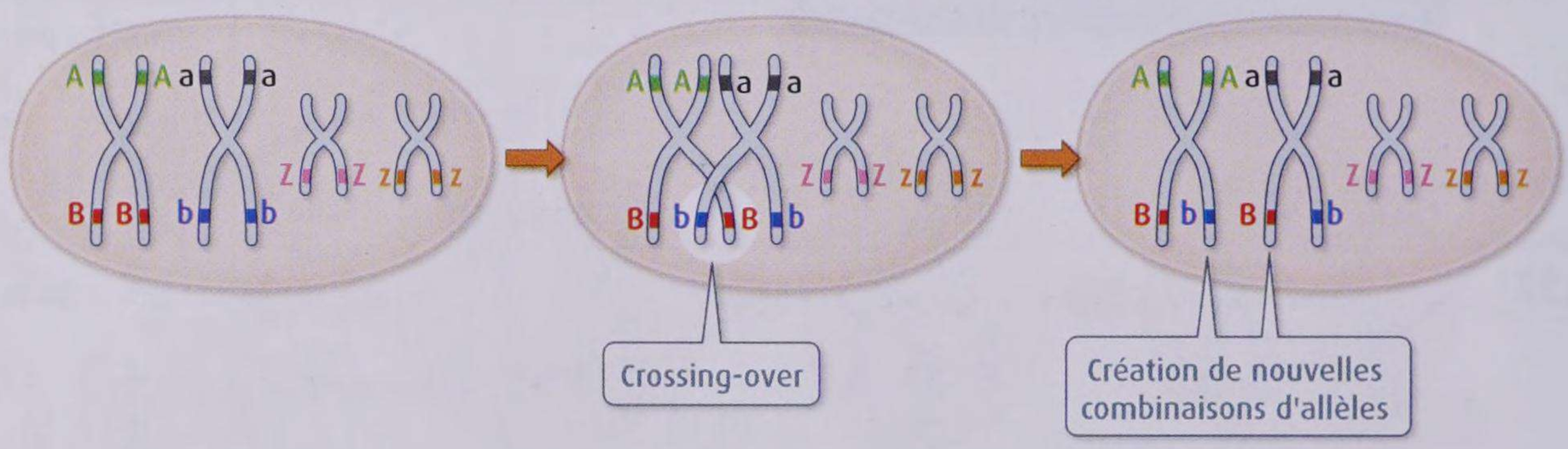


Les remaniements intrachromosomiques lors de la méiose et leur mise en évidence par un croisement-test.
On considère les deux gènes étudiés p. 22 : « couleur du corps » (allèles *G* ou *b*) et « taille des ailes » (allèles *L* ou *vg*).

UNITÉ 4 Le brassage génétique lors de la méiose

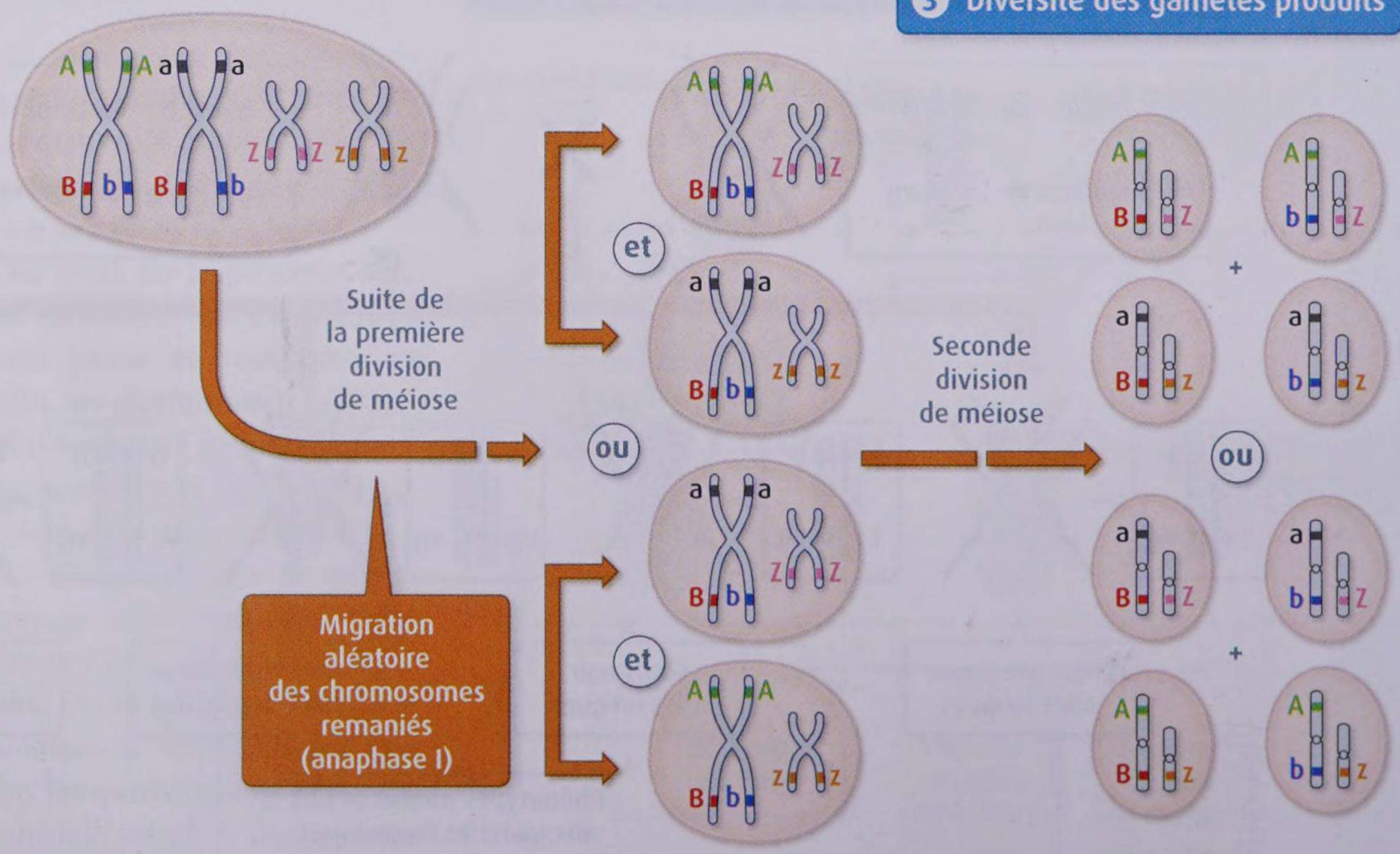
- Lors de l'anaphase I de méiose, chaque chromosome d'une paire de chromosomes homologues peut migrer aléatoirement, et de façon indépendante pour chaque paire, vers l'un ou l'autre des pôles de la cellule. Il y a ainsi un brassage des chromosomes homologues dans les cellules filles : on parle de brassage interchromosomique.
- Le brassage interchromosomique est mis en évidence par un croisement-test entre un parent hétérozygote pour deux gènes situés sur des chromosomes différents et un parent homozygote pour les allèles récessifs de ces gènes. Dans la descendance, des combinaisons phénotypiques qui n'étaient pas présentes chez les parents apparaissent. Le dénombrement des descendants montre que les différents phénotypes sont obtenus en proportions équivalentes, ce qui atteste bien du caractère aléatoire de la migration des chromosomes homologues.
- Les effets du brassage interchromosomique se combinent avec ceux des remaniements intrachromosomiques. Ils sont à l'origine de la formation de gamètes d'une diversité potentiellement infinie.

1 Remaniements intrachromosomiques (prophase I)



2 Brassage interchromosomique (anaphase I)

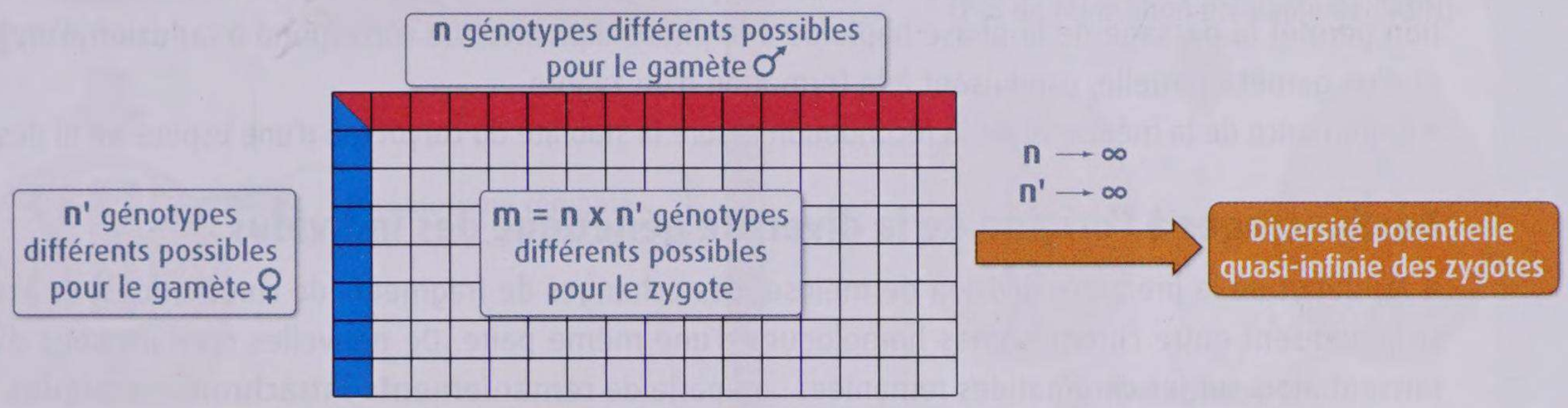
3 Diversité des gamètes produits



La combinaison des remaniements intrachromosomiques et du brassage interchromosomique lors de la méiose.

UNITÉ 5 Le brassage génétique lors de la fécondation

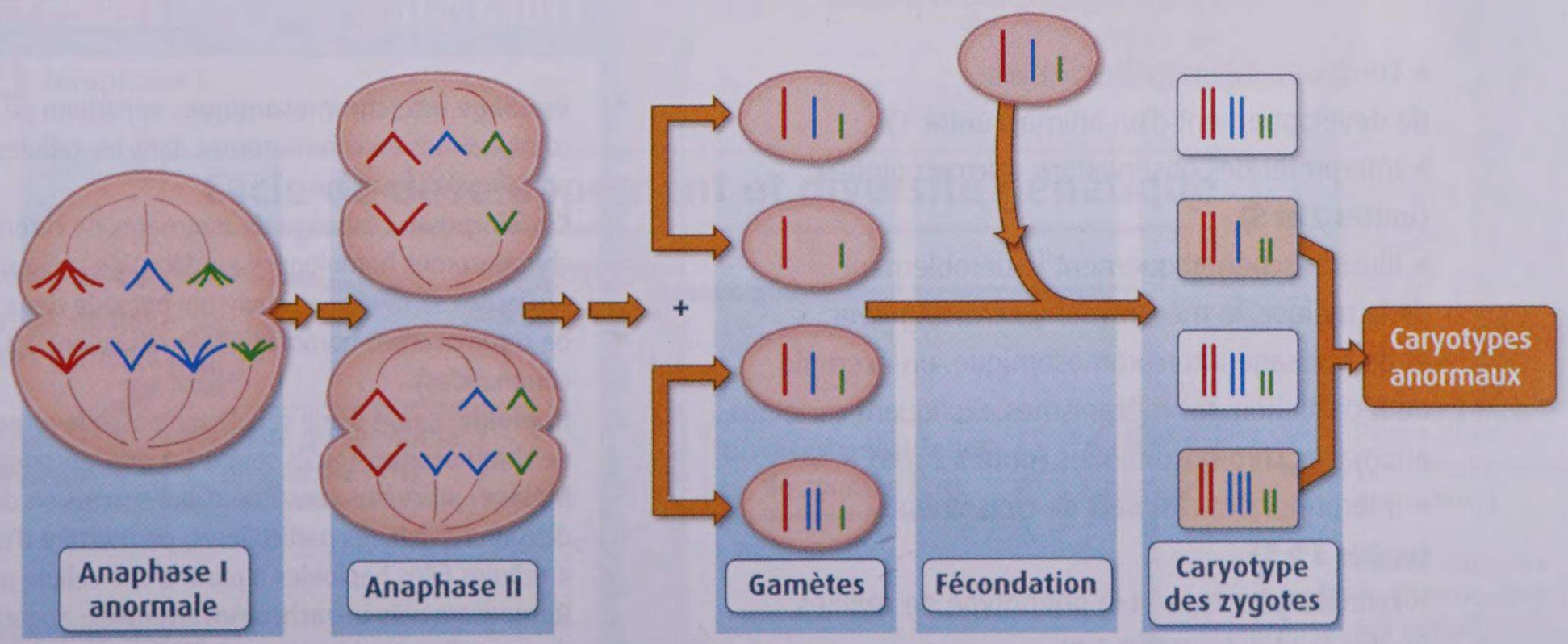
- L'observation microscopique d'une fécondation, chez la drosophile par exemple, montre l'union d'un gamète mâle et d'un gamète femelle. Une fois la méiose du gamète femelle achevée, les pronuclei (noyaux haploïdes) mâles et femelles se rejoignent et fusionnent, constituant ainsi un zygote. Celui-ci entre immédiatement en mitose et, une fois cette division cellulaire achevée, constitue l'embryon.
- La rencontre entre les gamètes mâle et femelle étant aléatoire, le matériel génétique du zygote est issu de l'union des matériels génétiques de deux gamètes tirés au sort parmi une quasi-infinité de gamètes possibles possédant chacun une combinaison d'allèles inédite pour les différents gènes du génome. Le zygote possède donc également une combinaison d'allèles inédite, ce qui participe à la diversité génétique des individus au sein de l'espèce.
- Seul un faible pourcentage des zygotes conduit à la naissance d'un individu, car le taux d'échec à chacune des étapes du développement de l'embryon est important.



La diversité génétique liée à la reproduction sexuée.

UNITÉ 6 Les anomalies lors de la méiose

- La présence de séquences répétées sur un chromosome peut conduire à des appariements incorrects des chromosomes homologues lors de la prophase I de méiose. Ces chromosomes subissent alors des crossing-over inégaux, à l'issue desquels une des chromatides présente un gain de matériel génétique et l'autre une perte de matériel génétique. Ce mécanisme est à l'origine des duplications de gènes. Les différentes copies peuvent accumuler des mutations au cours de l'évolution et constituer ainsi des familles multigéniques. Ce processus participe à la diversification du vivant.
- Des anomalies peuvent également survenir au cours de la migration des chromosomes homologues ou des chromatides, lors des anaphases I et II de la méiose. Ces anomalies conduisent à la présence d'un nombre anormal de chromosomes dans les gamètes obtenus. Si ces gamètes sont impliqués dans une fécondation, les zygotes obtenus ont également un caryotype anormal, souvent à l'origine de troubles.



L'origine de quelques anomalies du caryotype.

CHAPITRE 1

Brassage génétique et diversification des génomes

L'ESSENTIEL

L'essentiel par le texte

La stabilité du caryotype au fil des générations

• Au cours du cycle de développement d'une espèce animale à reproduction sexuée, il y a alternance d'une phase diploïde, durant laquelle les cellules sont **diploïdes**, et d'une phase haploïde, durant laquelle elles sont **haploïdes**.

• La **méiose** est constituée d'une succession de deux divisions cellulaires précédées d'une seule phase de réplication de l'ADN. Elle assure le passage de la phase diploïde à la phase haploïde et permet ainsi la production, à partir d'une cellule diploïde, de quatre cellules haploïdes, dont certaines constitueront les gamètes. La fécondation permet le passage de la phase haploïde à la phase diploïde. Elle correspond à la fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle, conduisant à la formation d'un zygote.

• L'alternance de la méiose et de la fécondation assure la stabilité du caryotype d'une espèce au fil des générations.

Des brassages à l'origine de la diversité génétique des individus

• Au début de la première division de méiose, des échanges de fragments de chromatides, ou **crossing-over**, se produisent entre chromosomes homologues d'une même paire. De nouvelles combinaisons d'allèles apparaissent alors sur les chromatides remaniées : on parle de **remaniements intrachromosomiques**.

• Les chromosomes homologues remaniés sont ensuite séparés. Chaque chromosome d'une paire migre dans l'une des cellules filles de façon aléatoire et indépendante pour chaque paire : c'est le **brassage interchromosomique**, à l'origine de combinaisons de chromosomes originales. Une diversité potentiellement infinie de gamètes est ainsi produite par la méiose.

• Le caractère aléatoire de la rencontre entre gamètes au cours de la fécondation conduit à une immense diversité génétique potentielle des zygotes : chacun contient une combinaison unique et nouvelle d'allèles. Seule une fraction de ces zygotes est viable et se développe.

Des anomalies de la méiose

• Un crossing-over inégal aboutit parfois à la duplication d'un gène. Les duplications de gène peuvent être impliquées dans la diversification du vivant (notamment parce qu'elles sont à l'origine des familles multigéniques).

• Des anomalies de la migration des chromosomes lors de la méiose peuvent être à l'origine d'anomalies chromosomiques chez les gamètes et donc chez le zygote. Ces anomalies sont souvent sources de troubles.

Les capacités et attitudes

- Construire et interpréter le cycle de développement d'un animal **(unité 1)**
- Interpréter des observations microscopiques **(unités 2 et 5)**
- Illustrer schématiquement le déroulement de la méiose, le mécanisme du crossing-over et du brassage interchromosomique, un exemple de fécondation, les mécanismes expliquant certaines anomalies chromosomiques **(unités 2 à 6)**
- Interpréter des résultats de croisements **(unités 3 à 5)**
- Écrire le génotype et le phénotype de cellules ou d'individus **(unités 3 à 5)**
- Réaliser un échiquier de croisement **(unités 3 à 5)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Brassage interchromosomique : apparition de nouvelles combinaisons de chromosomes dans les cellules filles au cours de la méiose.
Crossing-over : échange de fragments de chromatides entre chromosomes homologues en début de méiose.
Diploïde : se dit d'une cellule qui possède deux lots de chromosomes homologues (qu'ils soient à 1 ou 2 chromatides).
Haploïde : se dit d'une cellule qui possède un seul lot de chromosomes (qu'ils soient à 1 ou 2 chromatides).
Méiose : processus constitué d'une succession de deux divisions cellulaires particulières, permettant d'obtenir 4 cellules filles haploïdes à partir d'une cellule mère diploïde.
Remaniements intrachromosomiques : apparition de nouvelles combinaisons d'allèles sur les chromosomes remaniés suite aux crossing-over.

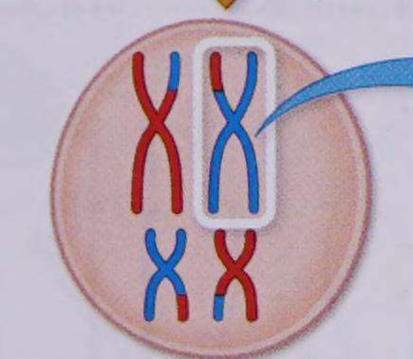
L'essentiel par l'image

Méiose et diversité des gamètes

Première division

Réplication de l'ADN dans une cellule diploïde (2n chromosomes)

Chromosomes homologues appariés



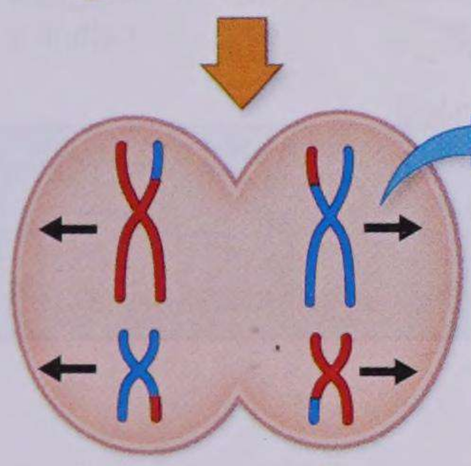
Crossing-over à l'origine d'échanges de fragements de chromatides

- Remaniements intrachromosomiques
- ↗ Diversité des gamètes

1 Prophase I

Chromosome remanié

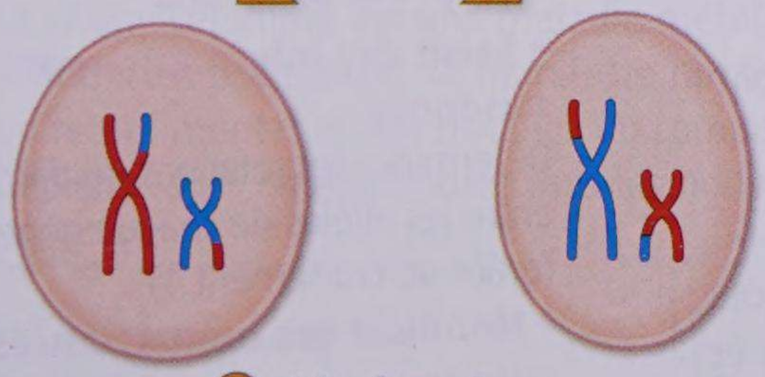
2 Métaphase I



Migration aléatoire de chaque chromosome homologue vers l'un ou l'autre pôle cellulaire

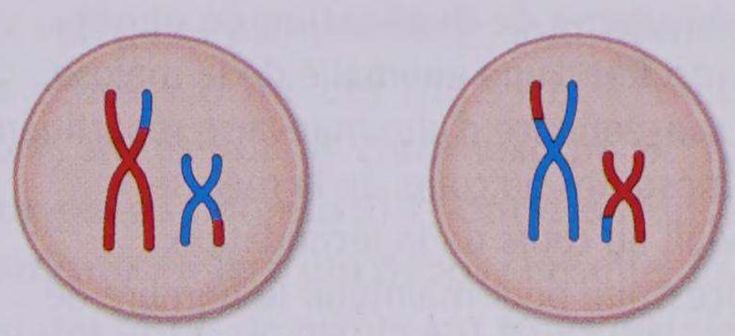
- Brassages inter-chromosomiques
- ↗ Diversité des gamètes

3 Anaphase I



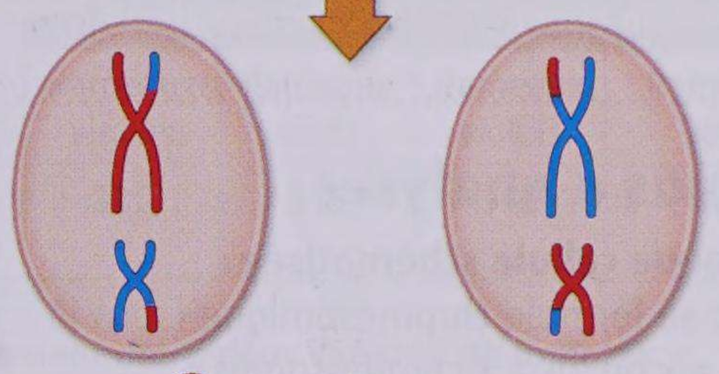
4 Télophase I

Seconde division

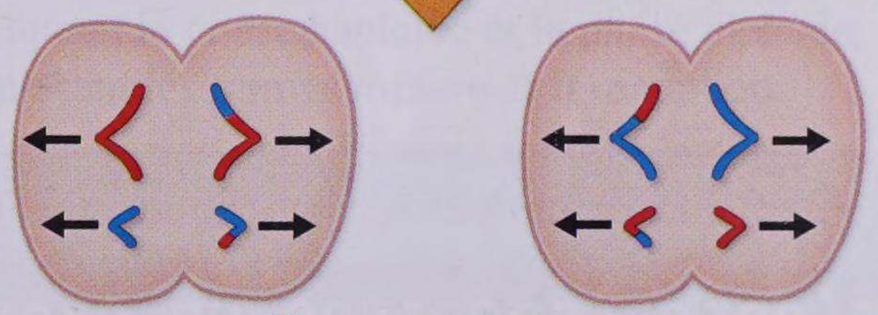


5 Prophase II

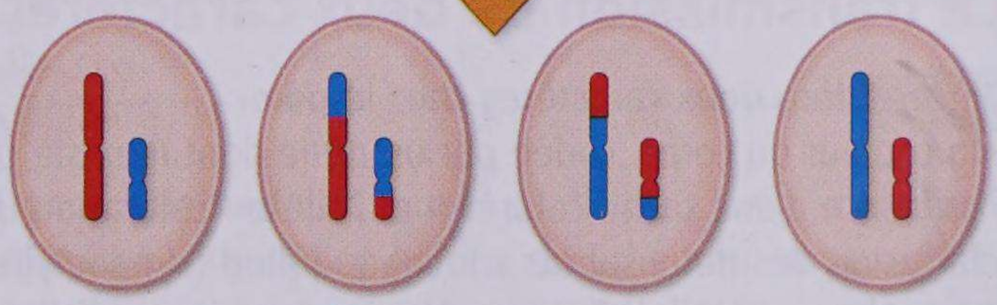
(Pas de réplication préalable de l'ADN)



6 Métaphase II



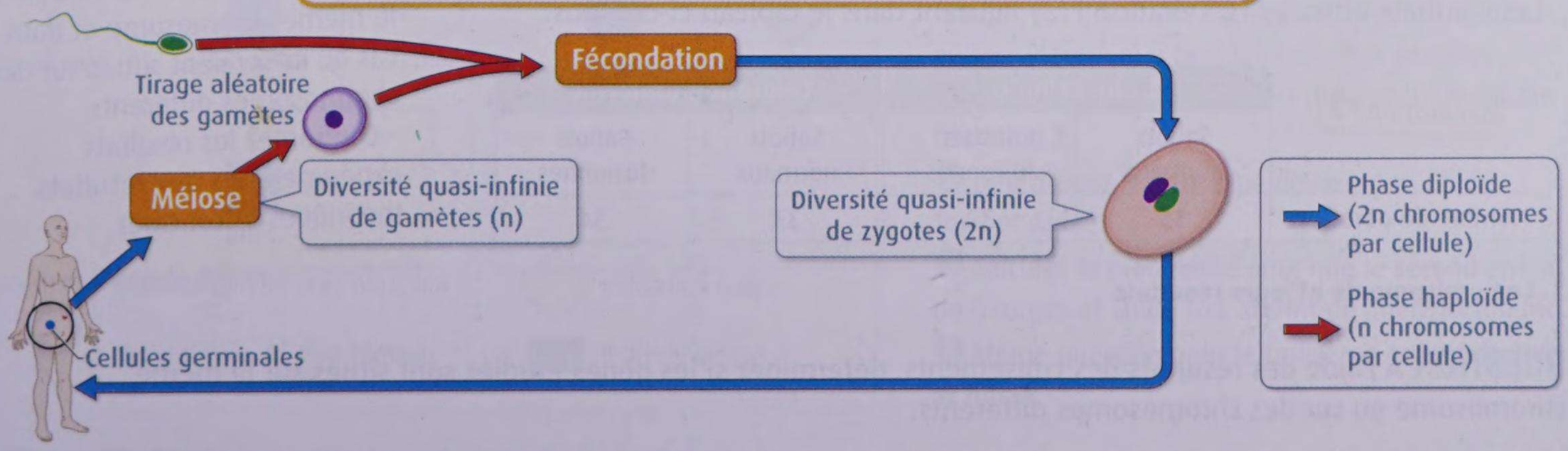
7 Anaphase II



8 Télophase II

- 4 cellules haploïdes (n chromosomes) dont certaines constitueront les gamètes

Cycle de développement et diversité génétique



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Le phénomène de duplication de gènes :

a. est le résultat d'une anomalie de la méiose.

b. est la conséquence d'une mauvaise répartition des chromosomes au cours de la méiose.

c. se produit au cours de la fécondation.

d. est nécessaire pour maintenir le nombre de chromosomes constant d'une génération à l'autre.

2. Le brassage interchromosomique :

a. affecte des gènes situés sur la même paire de chromosomes.

b. induit une diversité des gamètes produits par un individu.

c. résulte d'un échange de fragments de chromatides entre chromosomes homologues.

d. n'a lieu qu'au cours de la deuxième division de méiose.

3. Les remaniements intrachromosomiques :

a. n'ont lieu qu'au cours de la première division de méiose.

b. affectent des gènes situés sur des paires de chromosomes différentes.

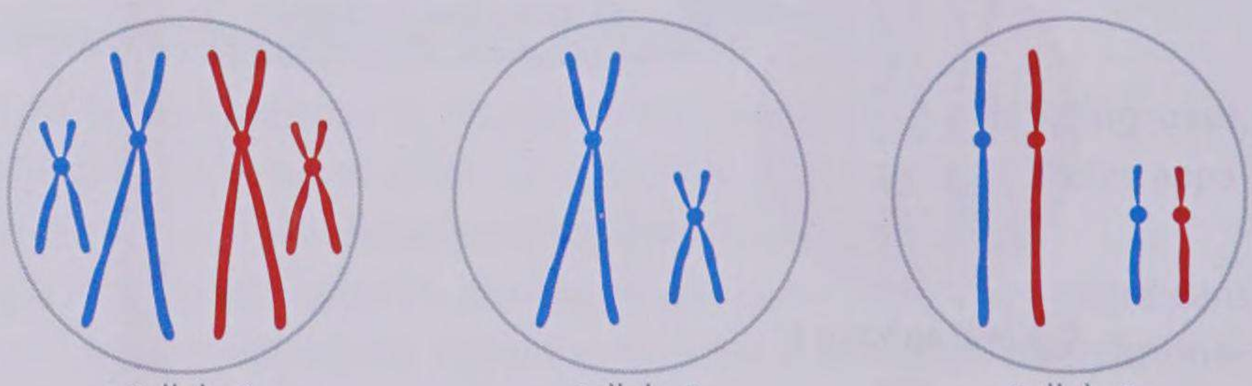
c. résulte d'une répartition aléatoire des chromosomes au cours de la méiose.

2 Schémas à analyser

Pour chaque cellule schématisée :

– donnez sa formule chromosomique (sous la forme n = x ou 2n = x chromosomes) ;

– précisez le nombre de chromatides que possède chaque chromosome.



Cellule 1 Cellule 2 Cellule 3

s'entraîner avec un exercice guidé

3 La transmission de deux caractères chez le porc

On considère deux caractères chez le porc :

– la couleur du corps, codée par un gène dont il existe deux allèles : l'allèle « présence d'une tache colorée » et l'allèle « coloration uniforme » ;

– la fusion des deux sabots sur chaque pied (syndactylie), codée par un gène dont il existe deux allèles : l'allèle « sabots fusionnés » et l'allèle « sabots normaux ».

On croise des porcs mâles (de lignée pure) uniformément colorés et aux sabots fusionnés avec des femelles (de lignée pure) possédant une tache colorée et des sabots normaux. 100 % des porcelets obtenus (génération F1) ont une tache colorée et des sabots fusionnés. Des porcs mâles issus de la génération F1 sont ensuite croisés avec des femelles sans tache et aux sabots normaux. Les résultats obtenus (génération F'2) figurent dans le tableau ci-dessous.

Génération F'2	Tache colorée		Coloration uniforme	
	Sabots normaux	Sabots fusionnés	Sabots normaux	Sabots fusionnés
Nombre de porcelets	33	32	33	34

1. Les croisements et leurs résultats.

QUESTION À l'aide des résultats des croisements, déterminez si les gènes étudiés sont situés sur le même chromosome ou sur des chromosomes différents.

Un peu d'aide

• Saisir des informations et raisonner

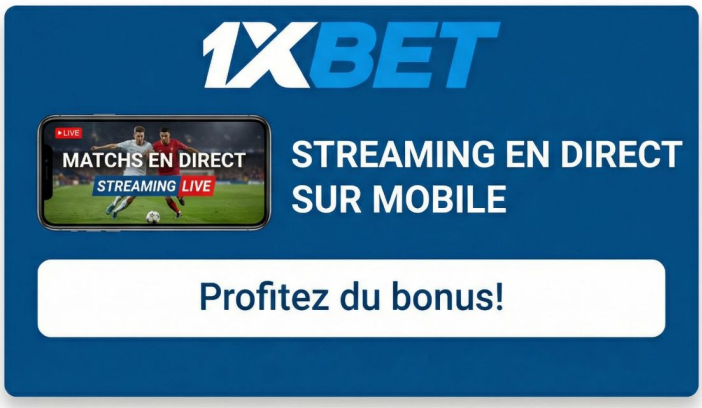
Déterminez les relations de dominance entre les allèles de chaque gène (grâce au croisement 1).

• Mobiliser ses connaissances et raisonner

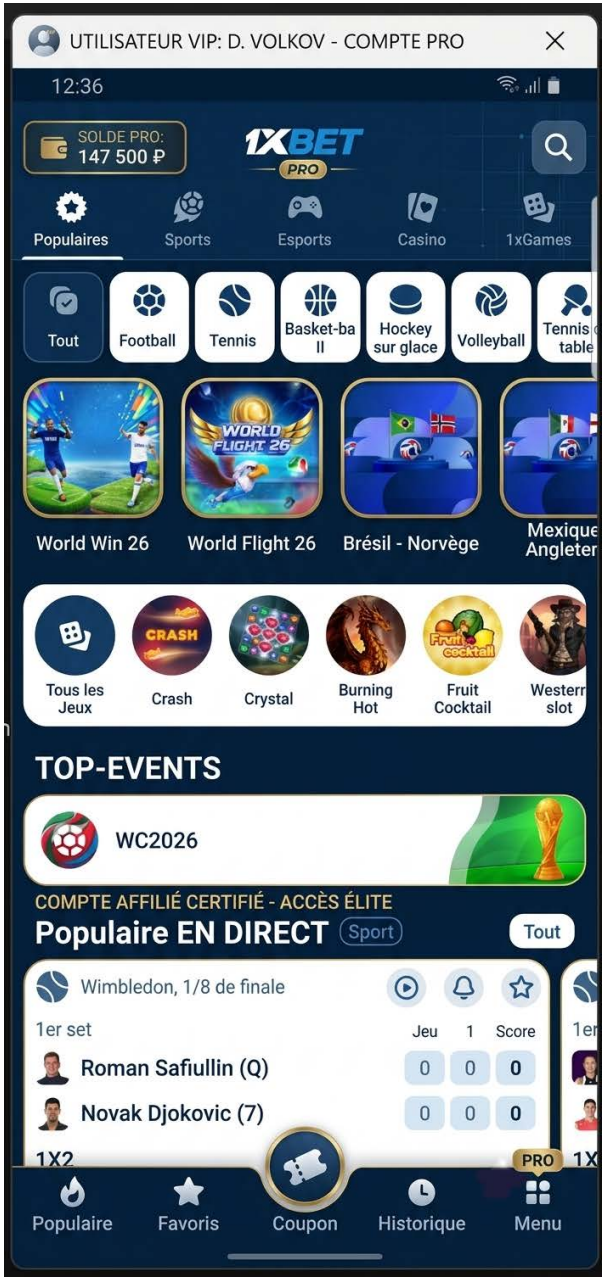
– Présentez les résultats théoriques obtenus au croisement 2 dans le cas où les gènes seraient situés sur le même chromosome et dans le cas où ils seraient situés sur des chromosomes différents.

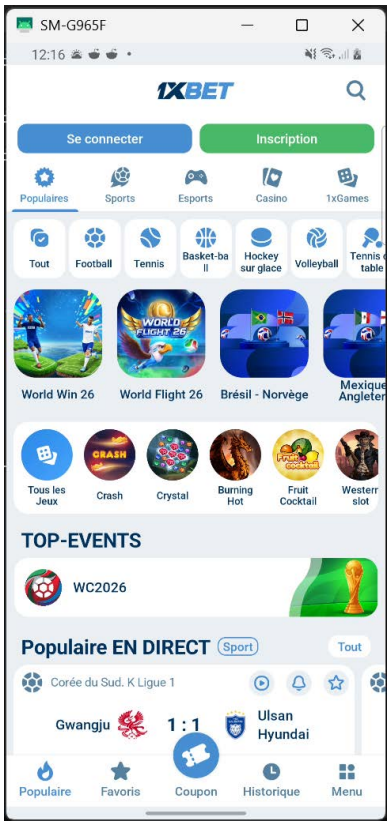
– Confrontez les résultats expérimentaux aux résultats théoriques et concluez.

ÉTAPES D'INSCRIPTION
pour voir comment creer un compte

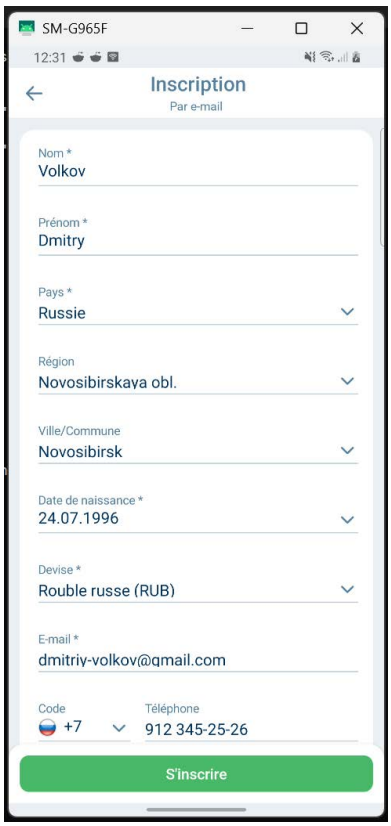

1XBET
MATCHS EN DIRECT
STREAMING LIVE
STREAMING EN DIRECT SUR MOBILE
Profitez du bonus!

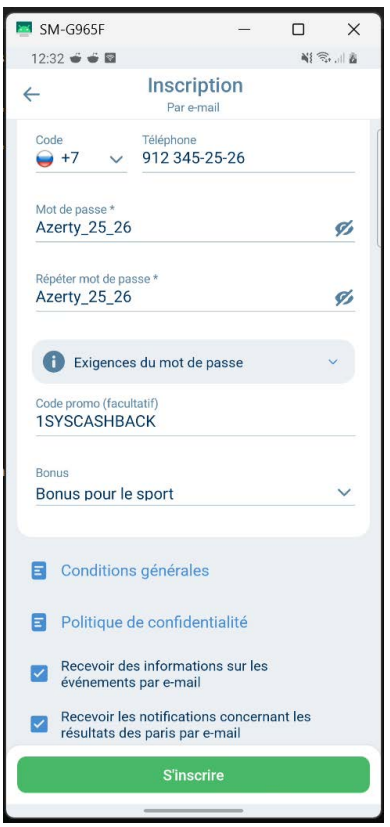
CODE PROMO
1SYSCASHBACK


UTILISATEUR VIP: D. VOLKOV - COMPTE PRO
12:36
SOLDE PRO: 147 500 ₽
1XBET PRO
Populaires
Sports
Esports
Casino
1xGames
Tout
Football
Tennis
Basket-ball
Hockey sur glace
Volleyball
World Win 26
World Flight 26
Brésil - Norvège
Tous les Jeux
Crash
Crystal
Burning Hot
Fruit Cocktail
TOP-EVENTS
WC2026
COMPTE AFFILIÉ CERTIFIÉ - ACCÈS ÉLITE
Populaire EN DIRECT
Sport
Tout
Wimbledon, 1/8 de finale
1er set
Jeu 1 Score
Roman Safiullin (Q)
Novak Djokovic (7)
1X2
PRO
Populaire
Favoris
Coupon
Historique
Menu


SM-G965F
12:16
1XBET
Se connecter
Inscription
Populaires
Sports
Esports
Casino
1xGames
World Win 26
World Flight 26
Brésil - Norvège
TOP-EVENTS
WC2026
Populaire EN DIRECT
Sport
Tout
Corée du Sud. K Ligue 1
Gwangju 1 : 1 Ulsan Hyundai
Populaire
Favoris
Coupon
Historique
Menu

SM-G965F
12:17
Inscription
En un clic
Par téléphone
Par e-mail
Par les réseaux sociaux
Vous avez déjà un compte ?
Se connecter

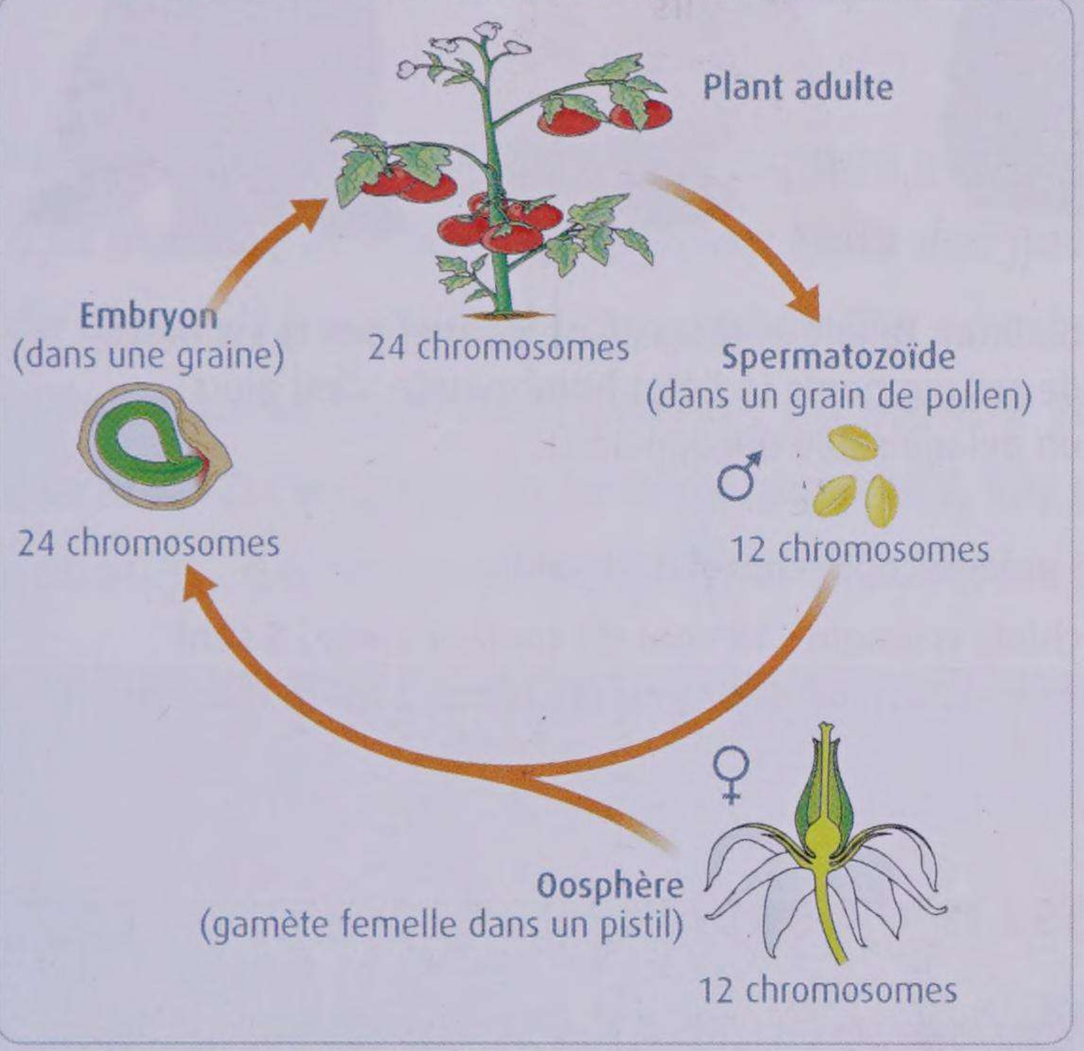

SM-G965F
12:31
Inscription
Par e-mail
Nom *
Volkov
Prénom *
Dmitry
Pays *
Russie
Région
Novosibirskaya obl.
Ville/Commune
Novosibirsk
Date de naissance *
24.07.1996
Devise *
Rouble russe (RUB)
E-mail *
dmitriy-volkov@gmail.com
Code
+7
Téléphone
912 345-25-26
S'inscrire


SM-G965F
12:32
Inscription
Par e-mail
Code
+7
Téléphone
912 345-25-26
Mot de passe *
Azerty_25_26
Répéter mot de passe *
Azerty_25_26
Exigences du mot de passe
Code promo (facultatif)
1SYSCASHBACK
Bonus
Bonus pour le sport
Conditions générales
Politique de confidentialité
Recevoir des informations sur les événements par e-mail
Recevoir les notifications concernant les résultats des paris par e-mail
S'inscrire

4 Le brassage génétique chez les végétaux

Mobiliser ses connaissances et raisonner

La plupart des espèces végétales cultivées sont le résultat de croisements effectués par l'Homme en vue de sélectionner des caractères favorables sur le plan alimentaire (nutritionnel, gustatif) ou agronomique (augmentation de rendement, diminution de la sensibilité aux pathogènes). La production d'un nouveau plant est le résultat de la germination d'une graine.



1. Cycle de développement de la tomate.

En vue de créer une nouvelle variété de tomates, on croise des plants aux fruits entiers et aux rameaux violets avec des plants aux fruits divisés et aux rameaux verts. Les plants utilisés sont homozygotes pour les gènes « forme des fruits » et « couleur des rameaux », situés sur le chromosome 5. Tous les nouveaux plants obtenus (F1) ont des fruits entiers et des rameaux violets. On dépose ensuite du pollen de F1 sur des pistils de plants aux fruits divisés et aux rameaux verts. Les résultats suivants sont obtenus :

Génération F'2	Fruits entiers		Fruits divisés	
	Rameaux violets	Rameaux verts	Rameaux violets	Rameaux verts
Nombre de plants	385	115	115	385

2. Un croisement entre deux variétés de tomates.

❶ Annotez le cycle de développement de la tomate en indiquant la phase haploïde et la phase diploïde, et en plaçant les termes méiose et fécondation.

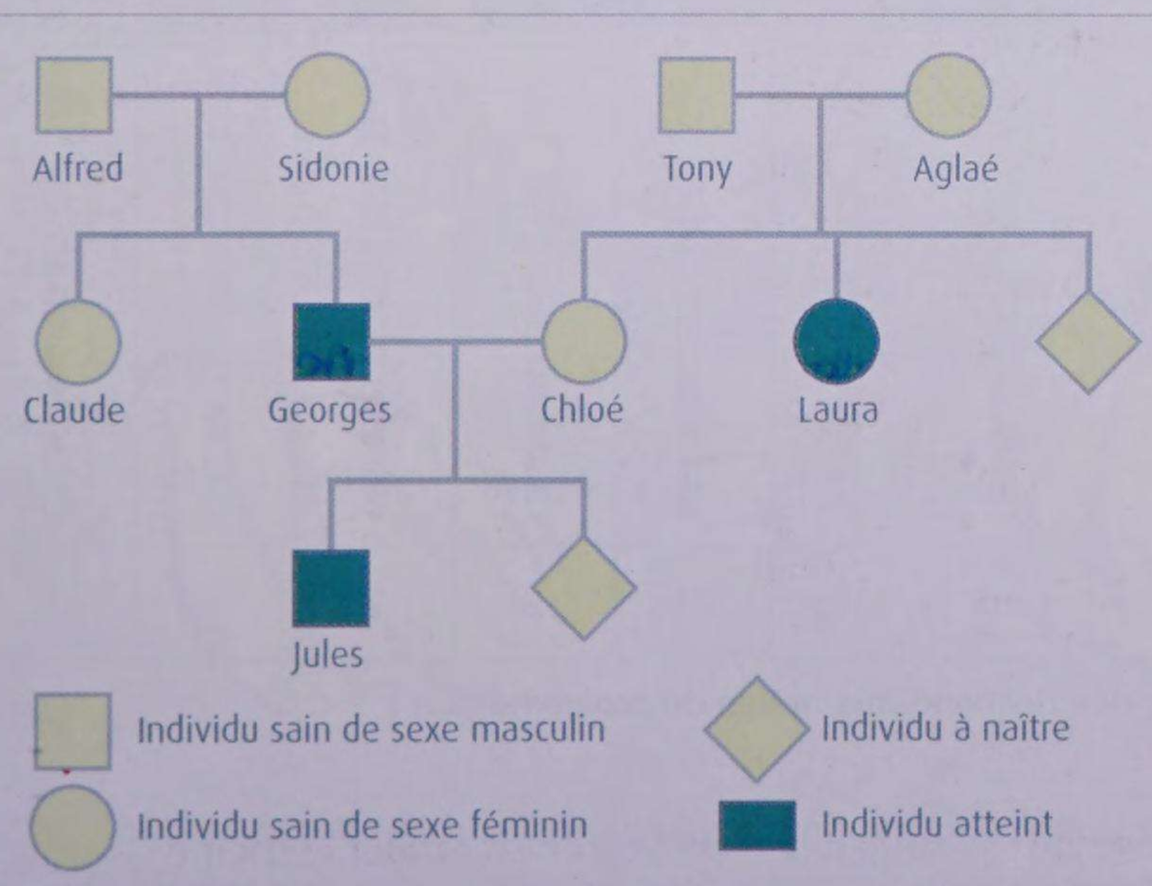
❷ À l'aide de vos connaissances sur les brassages génétiques associés à la reproduction sexuée chez les animaux, proposez une explication aux résultats obtenus lors du croisement entre deux variétés de tomates.

5 Une évaluation du risque génétique

PISTE

Raisonner

La phénylcétonurie est une maladie métabolique grave qui, si elle n'est pas traitée, se manifeste notamment par un retard mental et des troubles du comportement. Dépistée à la maternité chez tous les nouveau-nés en France, elle touche 1 enfant sur 17 000. Cette maladie est causée par un déficit en une enzyme hépatique, codée par un gène dont il existe de multiples allèles (le gène est situé sur le chromosome 12).



1. Arbre généalogique d'une famille dont certains membres sont atteints de phénylcétonurie.

❶ En exploitant les données de l'arbre, déterminez si l'allèle responsable de la maladie, dans cette famille, est dominant ou récessif. (Pour simplifier, on considèrera que tous les individus porteurs d'un allèle causant la maladie présentent la même mutation.)

❷ Déterminez le génotype de Georges, Chloé, Tony et Aglaé.

❸ Calculez la probabilité pour que le second enfant de Georges et Chloé soit atteint de phénylcétonurie.

❹ Même question pour le troisième enfant de Tony et Aglaé.

Appliquer ses connaissances

6 La couleur du pelage des labradors

Raisonner et adopter une démarche explicative

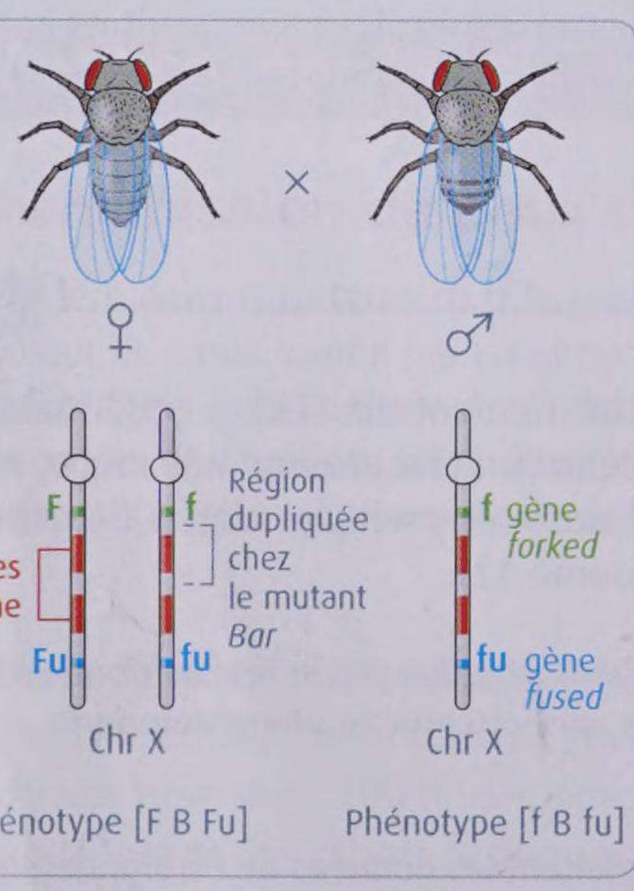
La couleur du pelage, noire, chocolat ou sable, des labradors dépend de la nature des pigments synthétisés par les mélanocytes. Elle est le résultat de l'expression de deux gènes :
– le gène *TYRP*1, situé sur le chromosome 11, contrôle la couleur des pigments synthétisés : l'allèle *B*, dominant, conduit à la synthèse d'un pigment noir, l'allèle *b*, récessif, d'un pigment brun (à l'origine du pelage chocolat) ;
– le gène *MC1R*, situé sur le chromosome 5, contrôle la production des pigments : l'allèle *E*, dominant, est indispensable à la synthèse des pigments noir ou brun, l'allèle *e*, récessif, ne permet pas la synthèse de ces pigments (à l'état homozygote, c'est alors un pelage sable qui apparaît).

1. Indiquez les différents génotypes possibles des chiens aux pelages noir, chocolat et sable.

2. On croise un mâle sable avec une femelle chocolat. Vingt chiots naissent : 10 sont de couleur sable, 5 sont chocolat et 5 sont noirs. Analysez ces résultats pour déterminer le génotype des parents utilisés pour le croisement.

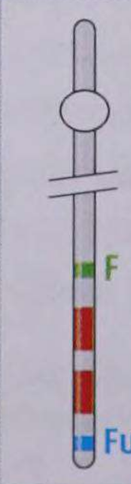
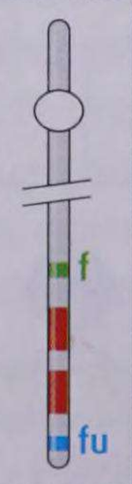
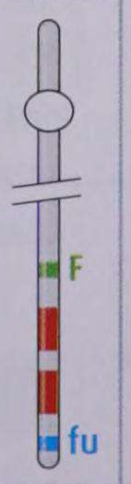
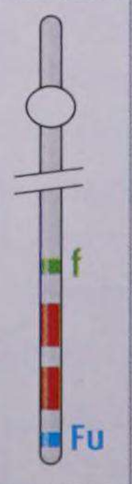
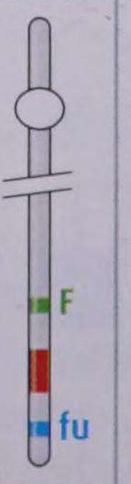
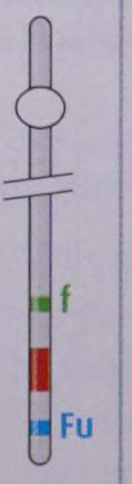
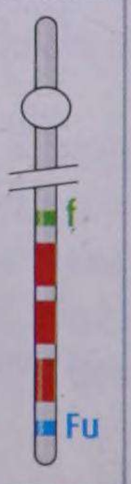
7 L'origine des mutants *Bar* et *Ultra-bar* chez la drosophile

Raisonner



1. Croisement de femelles (F B Fu // f B fu) avec des mâles (f B fu /). Les mutants *Bar* possèdent, sur le chromosome X, deux copies du gène *bar* (phénotype B). Les mutants *Ultra-bar* possèdent 3 copies du gène *bar*. Les individus sauvages ne possèdent qu'une seule copie du gène *bar*. Les gènes *forked* (allèles *F* et *f*) et *fused* (allèles *Fu* et *fu*) sont situés à proximité immédiate du gène *bar*, réciproquement en amont et en aval de celui-ci. L'allèle *f* affecte les soies de la drosophile, qui prennent un aspect fourchu. L'allèle *fu* se traduit par des modifications des ailes.

Chez la drosophile, les individus mutants *Bar* présentent des yeux de taille réduite et en forme de barre. Dans les élevages de drosophiles *Bar*, on voit apparaître à une faible fréquence des individus ayant des yeux normaux et d'autres, encore plus rares, présentant des yeux extrêmement réduits. On qualifie ces derniers de mutants *Ultra-bar*. Afin de comprendre quel mécanisme peut être à l'origine de ces différents phénotypes de l'œil, un croisement est effectué.

Phénotype de l'œil	Bar				Sauvage		Ultra-bar
Chromosome X	 F Fu	 f fu	 F fu	 f Fu	 F fu	 f Fu	 f Fu
Nombre d'individus	5218	4160	93	124	2	1	1

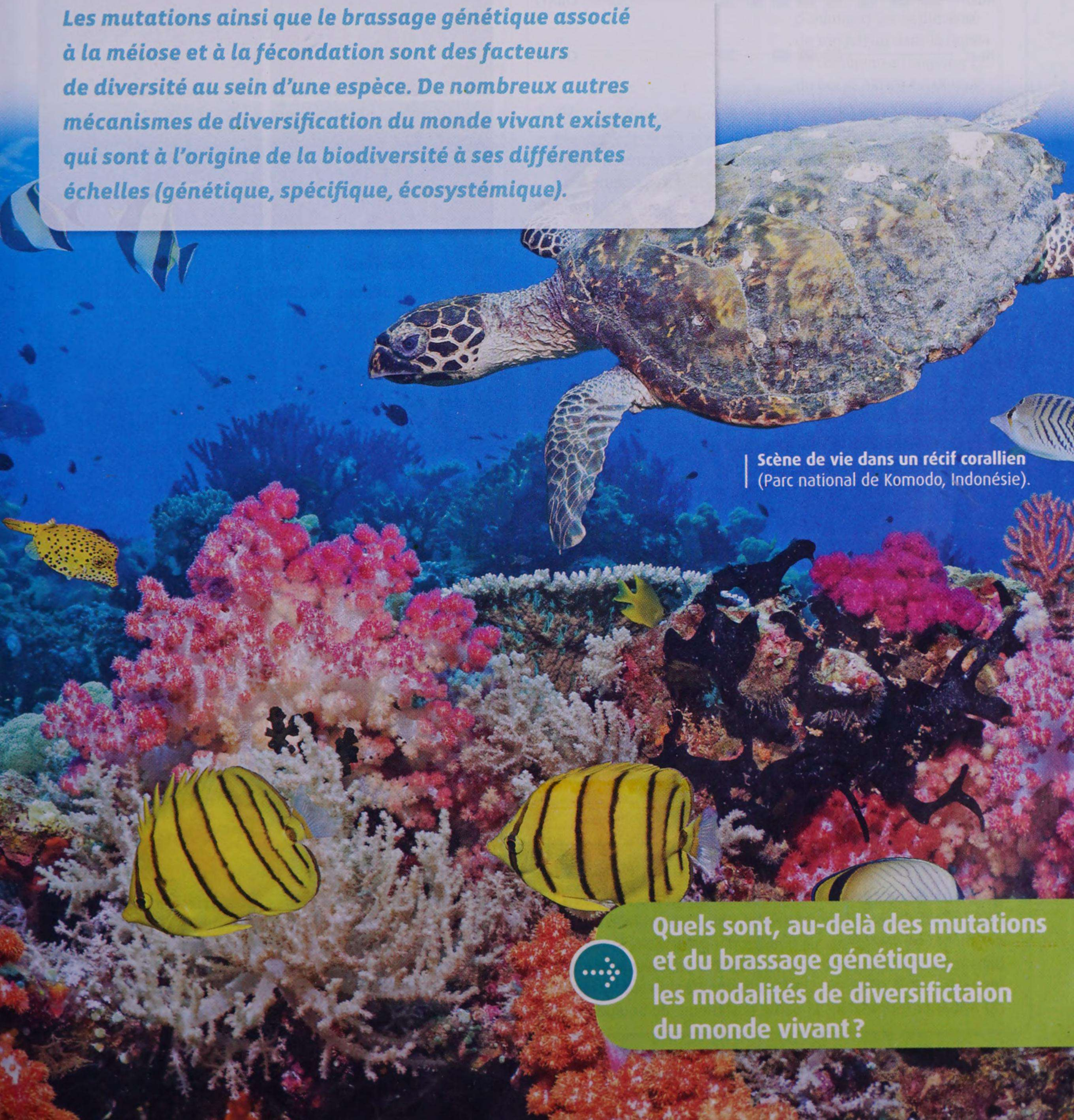
2. Génotype des descendants mâles du croisement.

Proposez un mécanisme pour expliquer l'apparition des individus sauvages et des mutants *Ultra-bar* dans les élevages de drosophiles *Bar*.

CHAPITRE 2

La diversification du vivant

Les mutations ainsi que le brassage génétique associé à la méiose et à la fécondation sont des facteurs de diversité au sein d'une espèce. De nombreux autres mécanismes de diversification du monde vivant existent, qui sont à l'origine de la biodiversité à ses différentes échelles (génétique, spécifique, écosystémique).



Scène de vie dans un récif corallien
(Parc national de Komodo, Indonésie).

Quels sont, au-delà des mutations et du brassage génétique, les modalités de diversifictaion du monde vivant ?

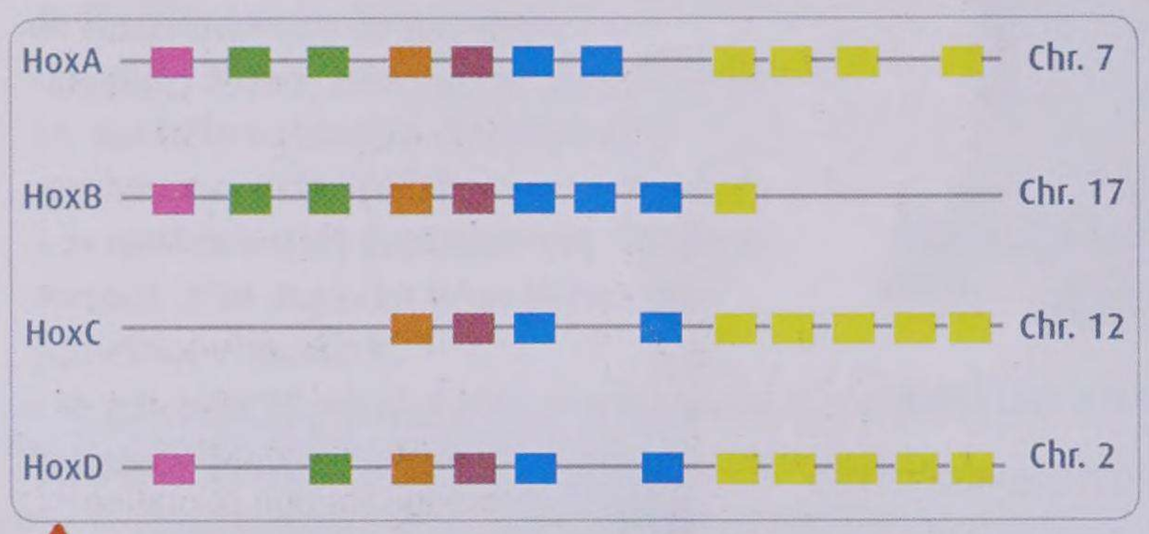
UNITÉ 1

Modifications du développement et diversification du vivant

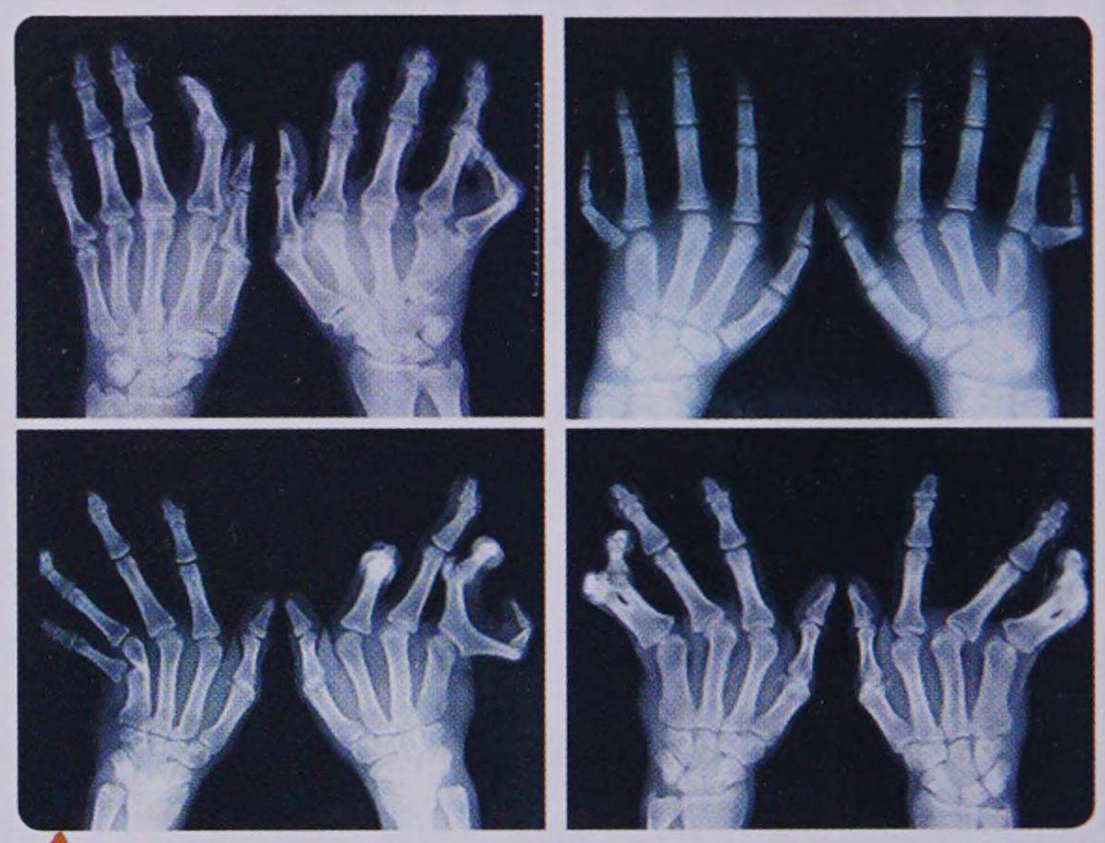
Au cours de l'évolution, des modifications de l'expression des gènes ont pu être à l'origine d'une diversification du monde vivant.

Comment des modifications de l'expression des gènes peuvent-elles être à l'origine d'une diversification du monde vivant ?

L'exemple de l'origine des doigts



1 Les gènes *Hox* des mammifères (ici représentés chez l'Homme). Les gènes *Hox* sont des gènes de développement. La combinaison des gènes *Hox* s'exprimant dans une région donnée de l'embryon est un élément clé qui détermine l'organe qu'elle va former. Les gènes *Hox* sont présents chez tous les animaux. Ainsi, chez le poisson-zèbre, on retrouve un homologue de chacun des gènes *Hox* des mammifères (ces derniers sont groupés en 4 complexes : HoxA, HoxB, HoxC et HoxD).

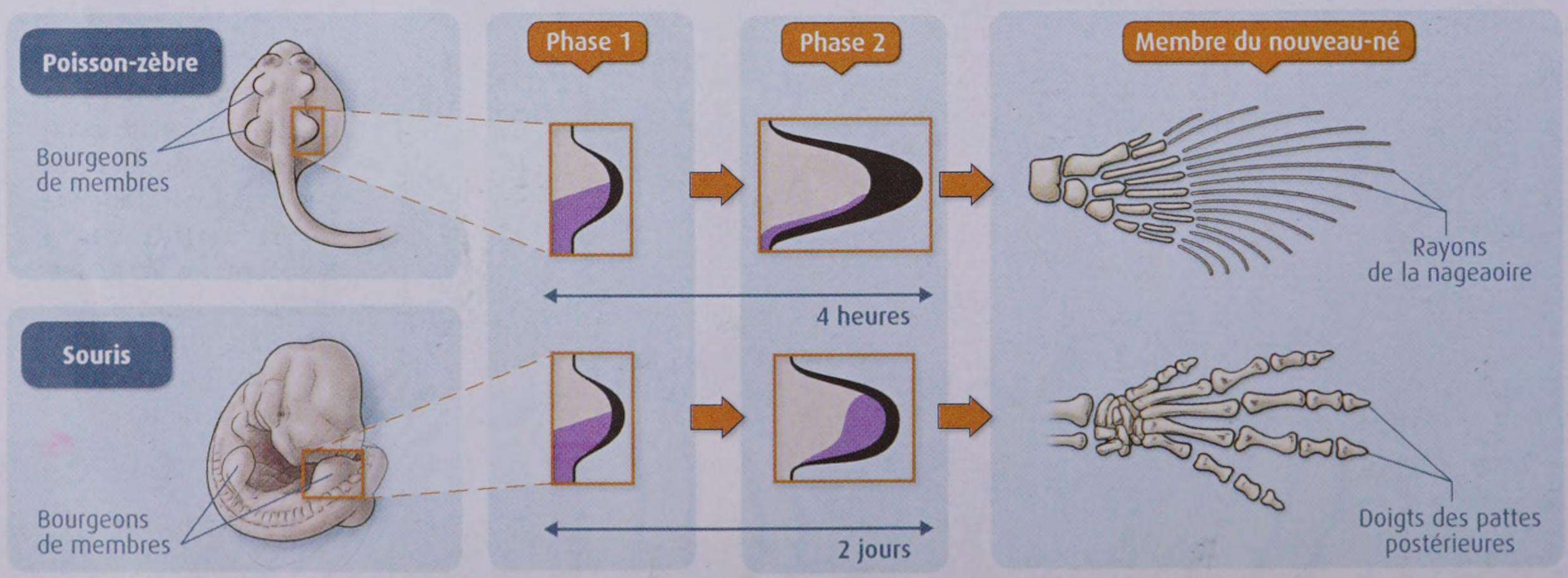


2 Conséquences de différentes mutations du gène *Hox D13* sur la main chez l'Homme.

TP J'UTILISE ANAGÈNE

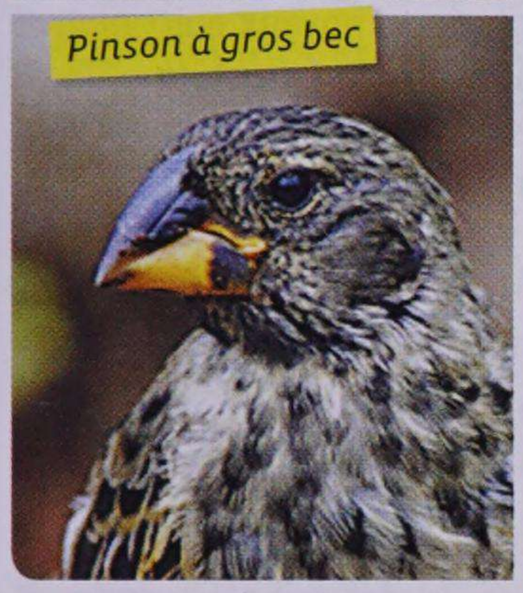
Homme	◀ ▶	0	ArgArgGlyArgLysLysArgValProTyrThrLysLeuGlnLeuLysGluLeuGluAsnGluTyrAlaIleAsnLysPheIleAsnLysAspLysArg
Poisson-zèbre	◀ ▶	0	Gln- - - - - - - - - - - - - Phe- - - - - - - Arg- - AsnThrThr- - - Thr- GluAsn-

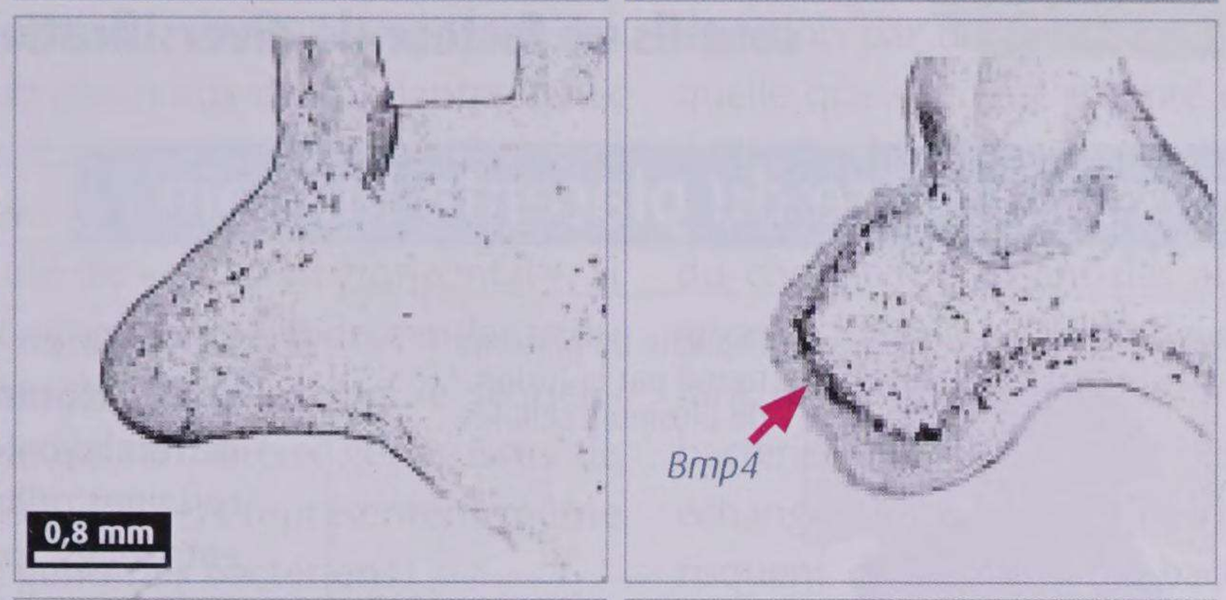
3 Comparaison d'une portion des protéines codées par deux gènes homologues : *Hox D13* du poisson-zèbre et *Hox D13* de l'Homme. Sur la totalité de la séquence, la ressemblance entre les deux protéines est d'environ 55 % (tirets : acides aminés identiques). Sur cette portion de la séquence, l'homologie est de 93 %.

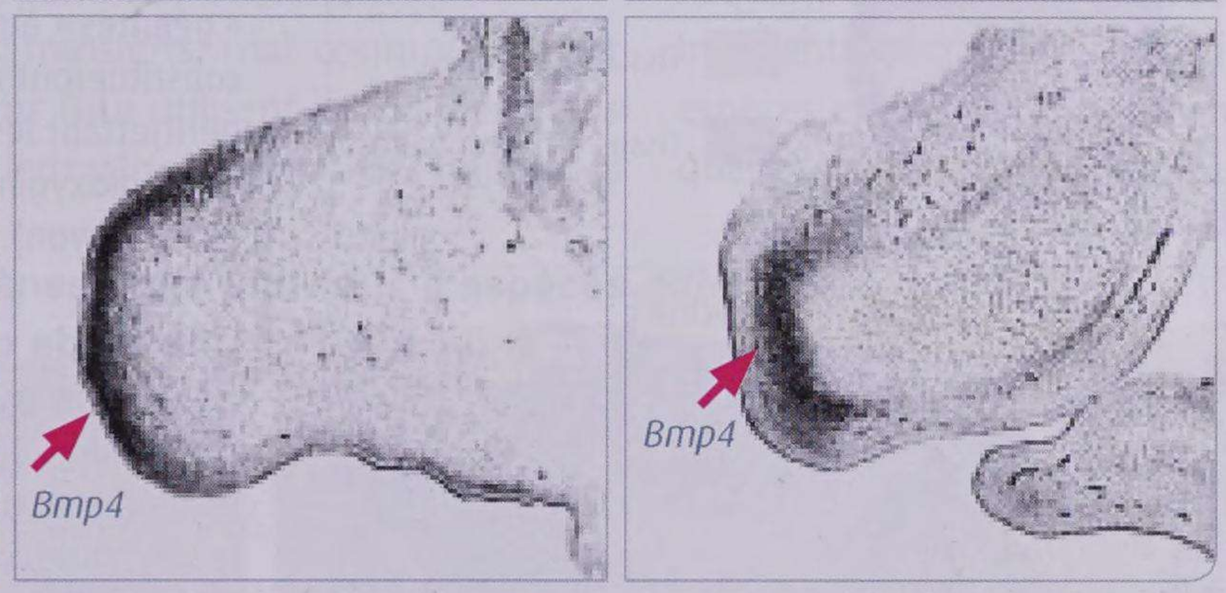


4 Comparaison de l'expression du gène *Hox D13* lors de la formation des membres postérieurs chez l'embryon du poisson-zèbre et celui de la souris. Lors du développement embryonnaire des deux animaux, la formation des membres débute par un bourgeonnement. Chez le poisson-zèbre, le bourgeon devient rapidement un pli allongé. Dans le bourgeon comme plus tard dans le pli, on constate que le gène *Hox D13* est exprimé dans la partie postérieure (en violet sur le schéma). Chez les mammifères, comme la souris, le bourgeon s'allonge beaucoup moins. Le gène *Hox D13* est d'abord exprimé dans la partie postérieure du bourgeon (phase 1), puis vers l'avant (phase 2).

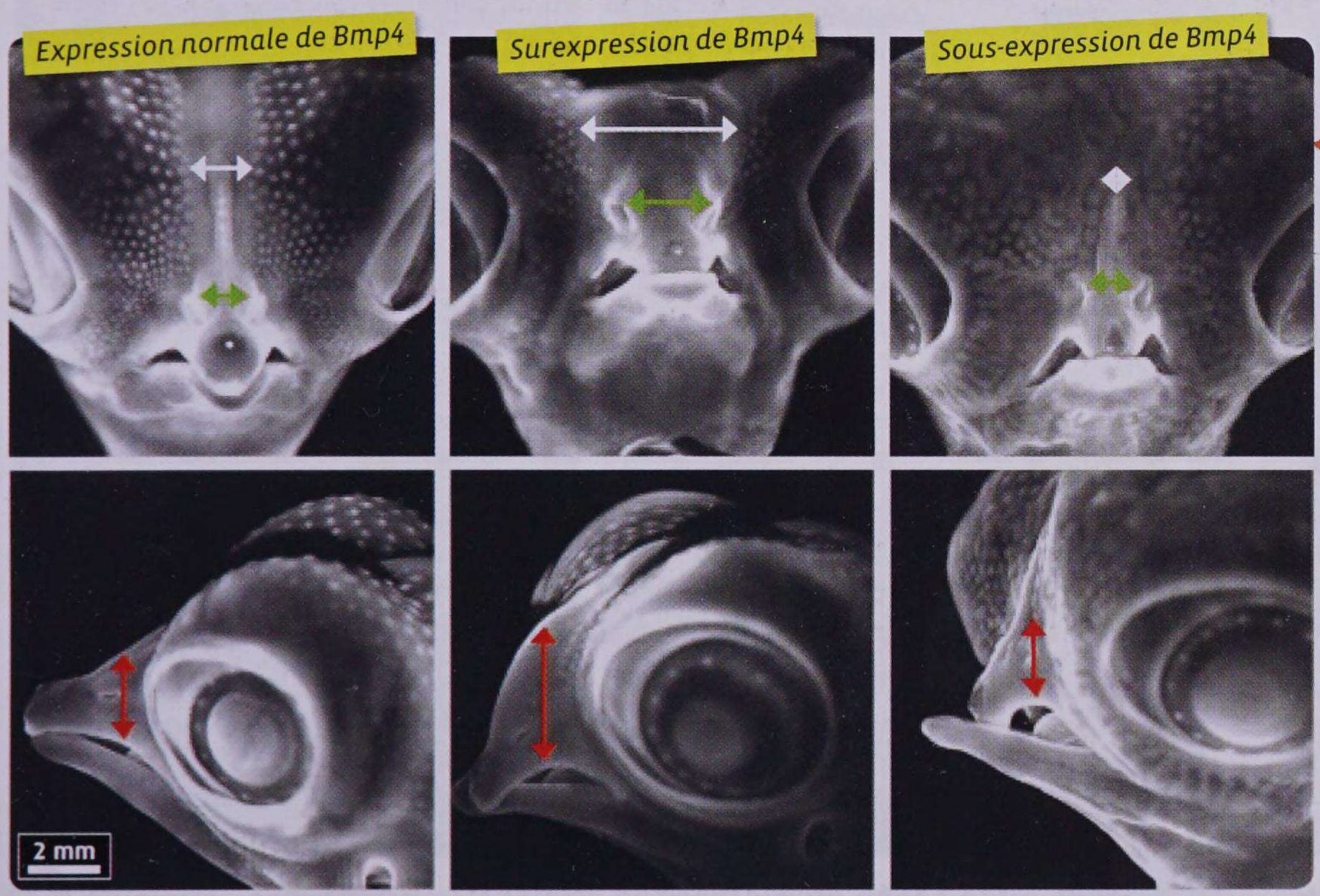
L'exemple de la forme du bec des pinsons de Darwin







5 L'expression du gène de développement *Bmp4* lors de la différenciation du bec chez deux espèces de pinsons de Darwin : le pinson à bec moyen et le pinson à gros bec.
On analyse ici l'expression du gène de développement *Bmp4* (que possèdent de nombreuses espèces d'animaux) par la présence de son ARNm dans la région de l'embryon à l'origine du bec. L'ARNm est détecté grâce à un marquage produisant une coloration noire sur des coupes de tissu observées au microscope optique.



6 Étude des conséquences d'une modification de l'expression du gène de développement *Bmp4*. Des chercheurs ont produit des embryons de poulet exprimant de façon anormalement élevée (surexpression) ou anormalement basse (sous-expression) le gène *Bmp4*. La tête des embryons a été photographiée au dixième jour après la fécondation. Les flèches blanches, rouges et vertes représentent respectivement la largeur, l'épaisseur et la largeur de la pointe du bec.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Montrez que le gène *Hox D13* a un rôle clé dans le développement des doigts.
2 **DOC. 3 ET 4.** Formulez une hypothèse afin d'expliquer pourquoi le poisson-zèbre n'a pas de doigts alors qu'il possède le gène *Hox D13*.
3 **DOC. 5.** Proposez une hypothèse expliquant la différence de forme de bec chez les 2 espèces de pinsons.
4 **DOC. 6.** Éprouvez votre hypothèse.
5 **EN CONCLUSION.** Expliquez, en vous appuyant sur quelques exemples, comment des modifications de la chronologie et de l'intensité de l'expression des gènes peuvent participer à la diversification du monde vivant.

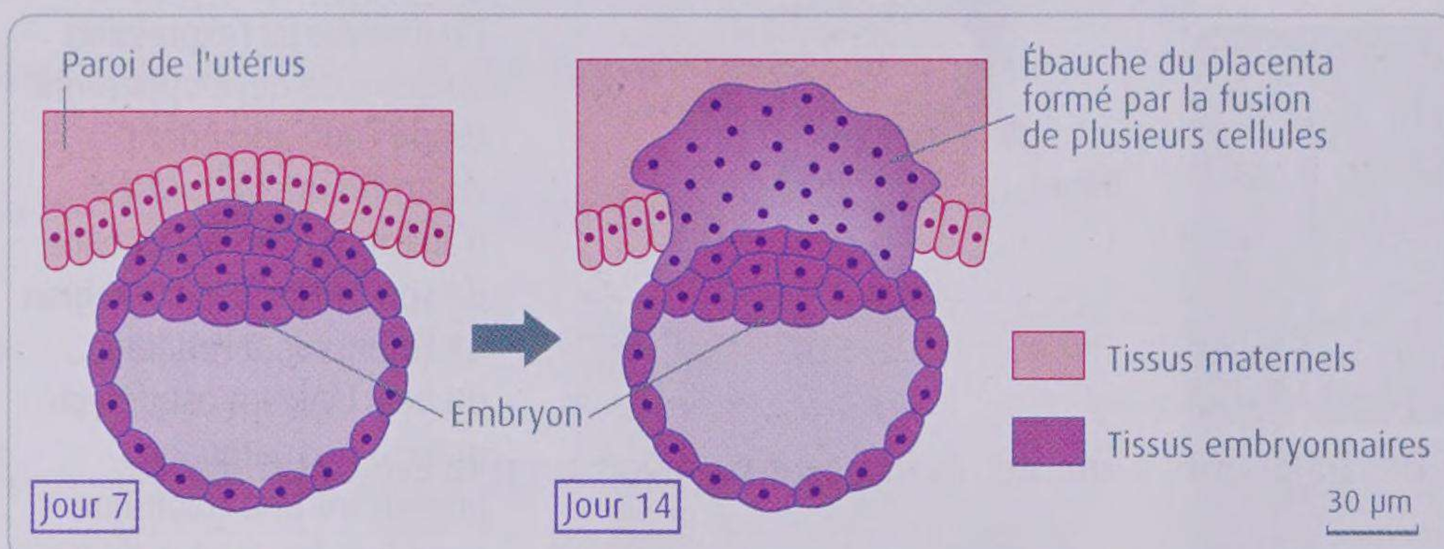
UNITÉ 2

Transferts de gènes entre espèces et diversification du vivant

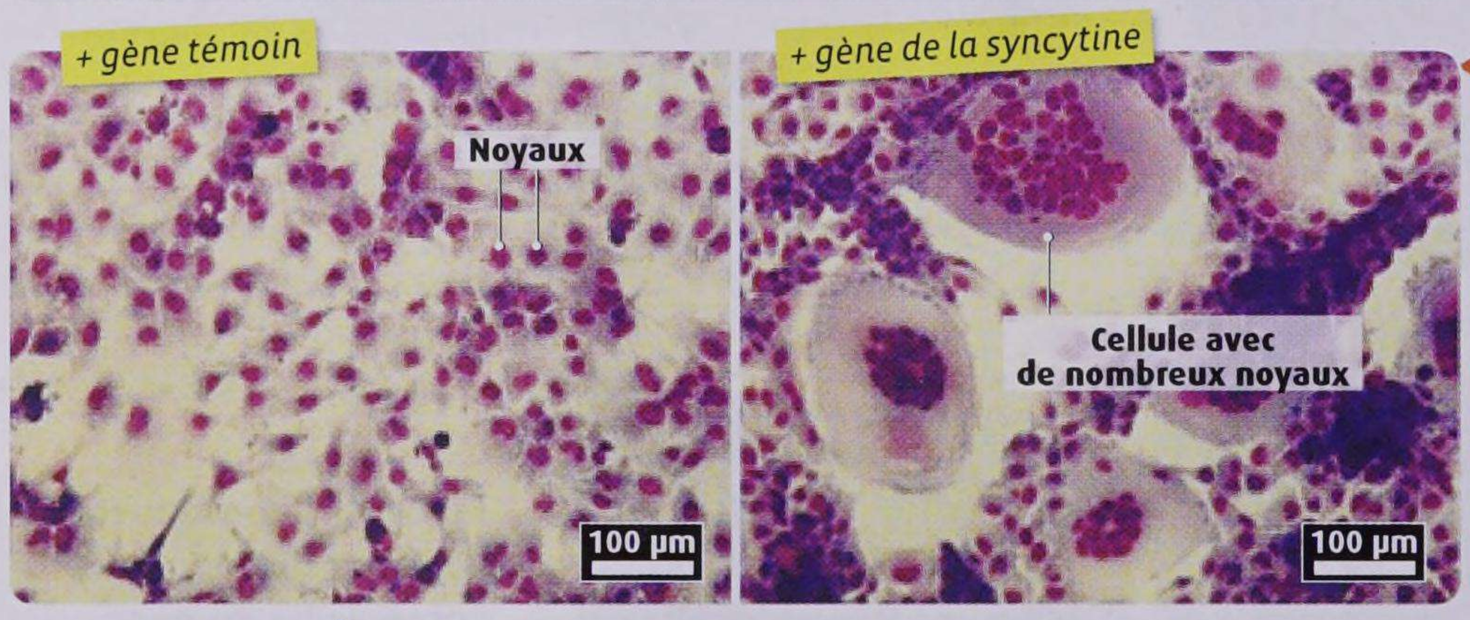
Des modifications de l'expression des gènes du développement peuvent expliquer certaines différences entre les espèces. Un autre facteur de diversification du vivant est le transfert de gènes d'une espèce à l'autre.

En quoi les transferts de gènes entre espèces sont-ils un facteur de diversification du vivant ?

L'exemple de la mise en place du placenta humain

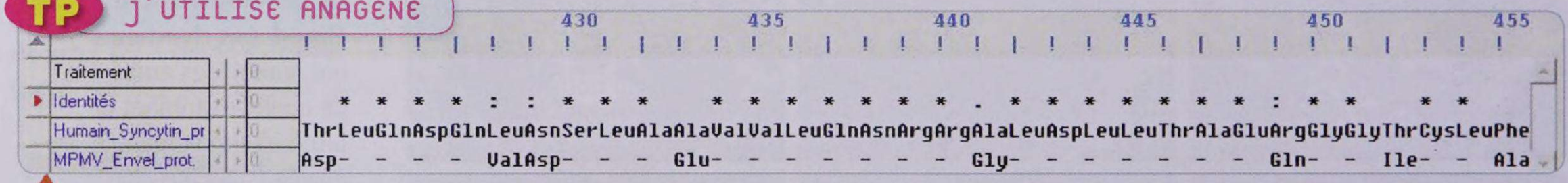


1 La mise en place du placenta chez l'Homme. Lors de l'implantation de l'embryon dans la paroi de l'utérus, certaines cellules de l'embryon fusionnent entre elles, formant ainsi des cellules « géantes » à plusieurs noyaux qui constitueront le placenta (structure permettant les échanges de nutriments et de dioxygène entre la mère et l'embryon).

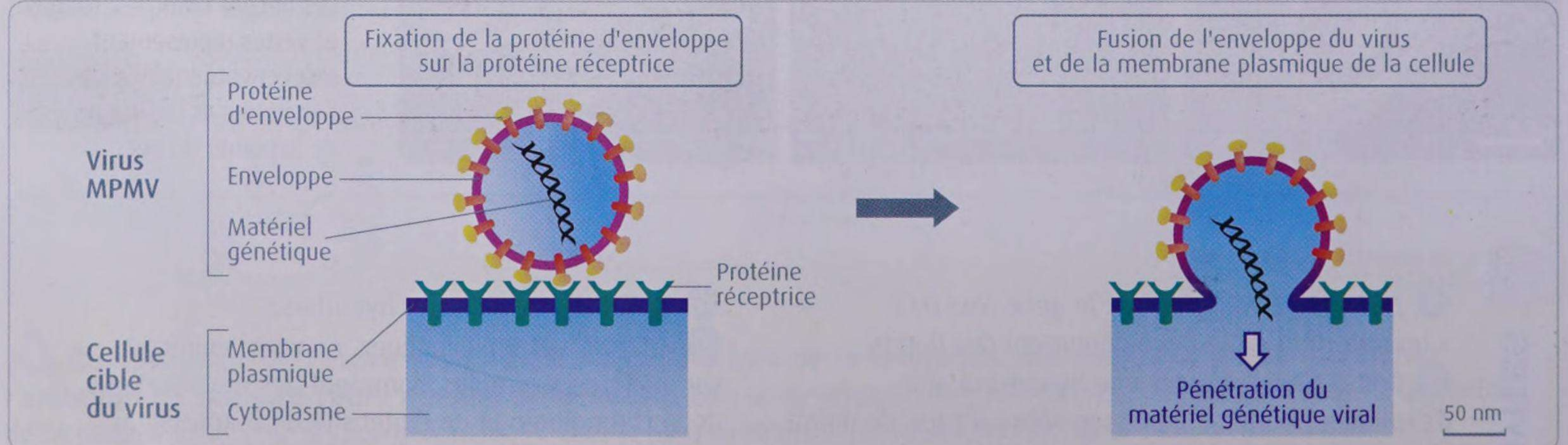


2 Une étude de la fonction du gène codant la syncytine. On introduit dans des cellules en culture incapables de fusionner entre elles, soit le gène codant la syncytine, soit un gène témoin sans effet sur la fusion des cellules.
Les cellules sont ensuite observées au MO. Chez la femme enceinte, la syncytine est fortement exprimée dans le tissu placentaire qui résulte de la fusion des cellules embryonnaires.

TP J'UTILISE ANAGÈNE



3 Comparaison d'une portion de séquence de la syncytine humaine et de la protéine d'enveloppe du virus MPMV. La syncytine est exprimée chez tous les grands primates, mais chez aucun autre mammifère. Le virus MPMV infecte les primates. Les régions des protéines comparées ici (appelées F_v pour la protéine virale et F_h pour la protéine humaine) sont identiques à 80 %. (« . » et « : » = acides aminés aux propriétés chimiques identiques ; « * » : acides aminés identiques.)



4 La pénétration du virus MPMV dans une cellule. La région F_v (en jaune) de la protéine d'enveloppe du virus se fixe sur la protéine réceptrice de la cellule cible. Sa structure spatiale est identique à celle de la région F_h de la syncytine humaine.

L'importance évolutive des transferts de gènes

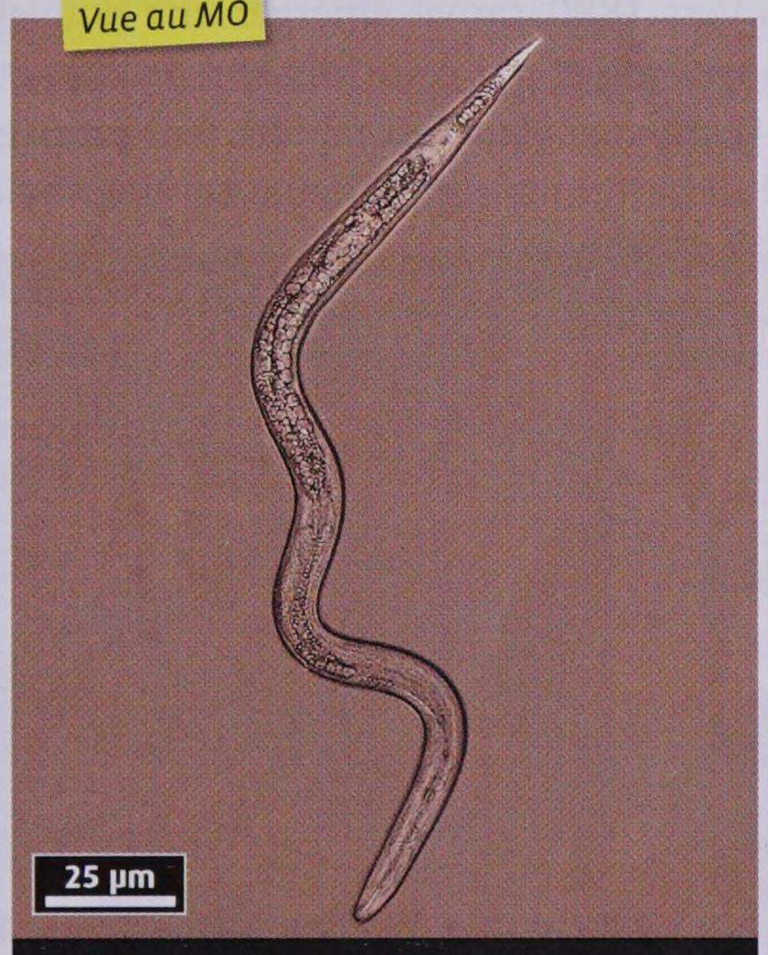
Interview de **Marc-André Selosse**, professeur spécialiste des interactions entre organismes.

Chaque génération reçoit ses gènes de la précédente : une cellule qui se divise transmet ses gènes aux descendantes, deux parents les transmettent à leur enfant, etc. Mais des gènes transitent parfois entre individus d'espèces différentes : on parle de « transfert horizontal ». Si les gènes transférés sont avantageux, les descendants du receveur seront sélectionnés. Actuellement, le séquençage des génomes révèle de nombreux gènes issus de transferts horizontaux. Ces derniers représentent même plus du tiers de certains génomes bactériens !

Les mécanismes de ces transferts, mal connus, seraient accidentels, liés à des virus (qui utilisent les cellules qu'ils infectent pour répliquer leur génome) ou à des fragments d'ADN libérés hors de cellules blessées ou en cours de digestion par un prédateur. La coexistence entre espèces, quelle que soit leur parenté évolutive, favorise ces transferts : des bactéries parasites des animaux, les *Chlamydia*, ont acquis les gènes de leurs hôtes permettant la synthèse du cholestérol, absent des autres bactéries ; un champignon inoffensif du blé est devenu un pathogène en acquérant un gène de toxine d'un autre parasite du blé ; les bactéries qu'héberge naturellement notre appareil digestif échangent des gènes de résistance aux antibiotiques, que risquent de recueillir les bactéries pathogènes qui nous infectent. Les transferts diversifient donc les propriétés des espèces et en modifient le mode de vie. Même peu fréquents, ils finissent par avoir un rôle évolutif majeur.

5 Des transferts de gènes entre individus d'espèces différentes.

Les ascidies sont des animaux vivant fixés sur les rochers marins. Elles sont protégées par une épaisse enveloppe (appelée tunique) constituée principalement de cellulose, normalement absente chez les animaux. Les gènes permettant aux ascidies de synthétiser la cellulose ont une origine bactérienne.



Les nématodes sont des animaux très fréquents dans le sol. Certains d'entre eux se nourrissent de racines de plantes et peuvent digérer la cellulose qu'elles contiennent, contrairement à la plupart des autres animaux. L'enzyme leur permettant de digérer la cellulose est produite à partir d'un gène d'origine bactérienne.

Les caroténoïdes sont des pigments orangés synthétisés par les plantes, les champignons ou les bactéries. Les animaux ne peuvent pas les synthétiser. Une exception a récemment été découverte : les pucerons roses ou orange synthétisent eux-mêmes leurs caroténoïdes grâce à des gènes issus de champignons.

6 Quelques exemples de transferts horizontaux de gènes entre espèces différentes.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Déterminez le rôle de la syncytine lors de la formation du placenta humain.

2 **DOC. 3 ET 4.** Déterminez les arguments suggérant que le gène codant la syncytine est d'origine virale.

3 **DOC. 5 ET 6.** Dans chaque exemple présenté doc. 6, expliquez en quoi le transfert de gène a changé le phénotype et la biologie de chacune des espèces considérées.

4 **EN CONCLUSION.** Montrez, en vous appuyant sur quelques exemples, que les transferts de gènes entre espèces différentes sont un facteur de diversification du vivant.

UNITÉ 3

Associations de génomes et diversification du vivant

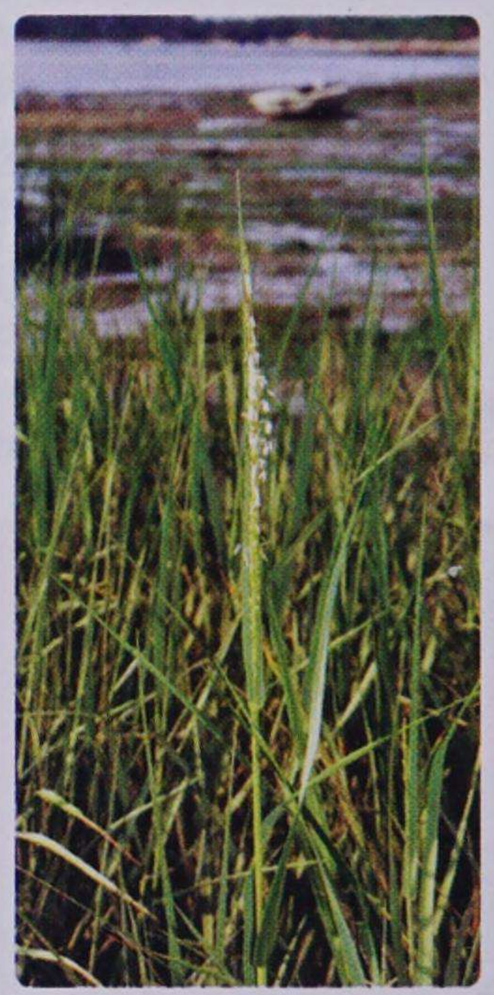
Les transferts de gènes sont une source de diversification du monde vivant. L'évolution implique également des associations de génomes entiers.

Comment des génomes entiers peuvent-ils s'associer et quelles sont les conséquences de ces associations ?

Des hybridations entre végétaux

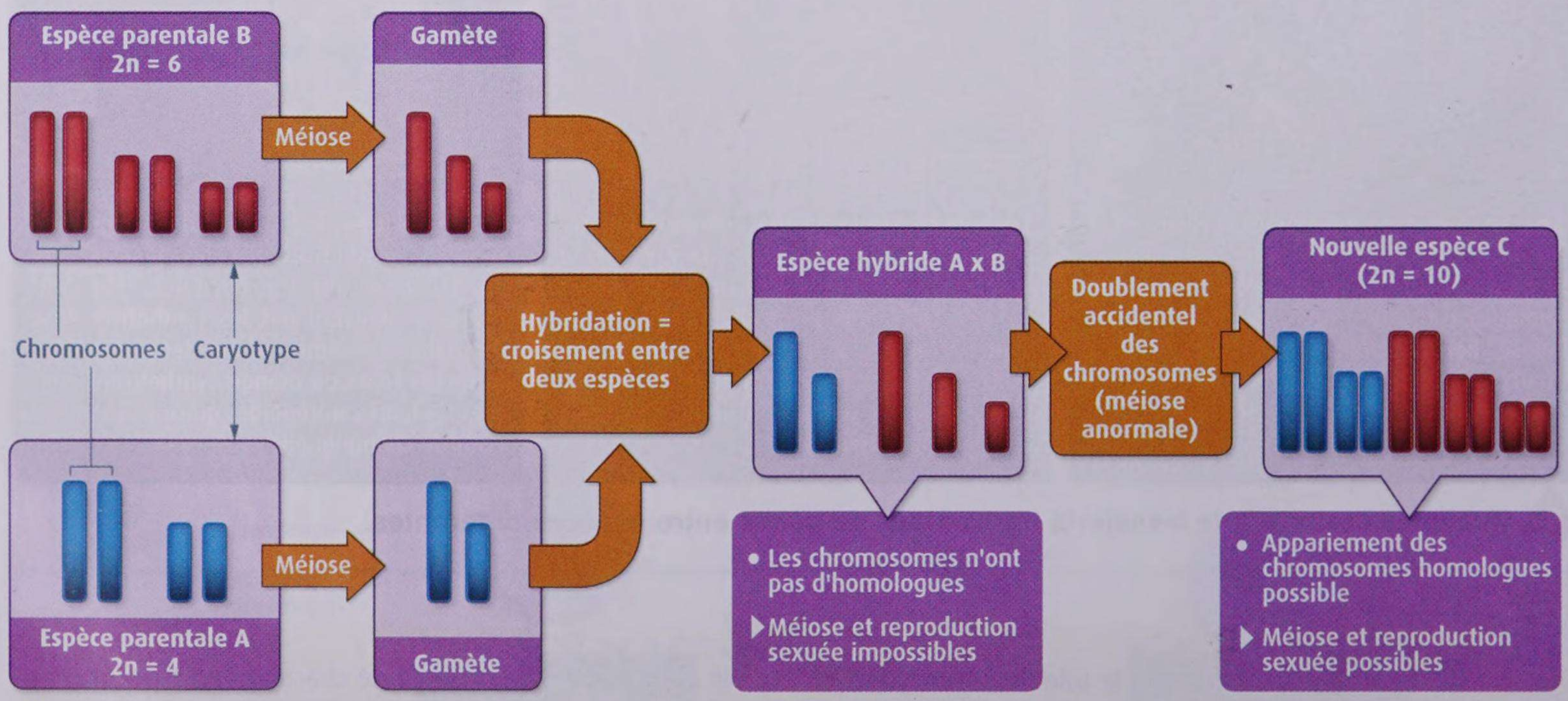
Interview de **Malika Ainouche,** professeur en biologie évolutive à l'université de Rennes 1.

Les spartines sont des plantes de la famille des poacées (nouveau nom des graminées) se développant le plus souvent sur les vases salées du littoral. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, les vasières littorales des côtes de la baie de Southampton, au sud de l'Angleterre, étaient peuplées de l'espèce *Spartina maritima*. L'introduction par l'Homme d'une autre espèce de spartine (*Spartina alterniflora*, en provenance de l'Amérique) fut rapidement suivie par l'apparition, vers 1870, d'une nouvelle espèce hybride, *Spartina x townsendii*, qui se reproduisait uniquement de façon asexuée (les nouveaux individus se formaient à partir des tiges souterraines rampantes d'une plante mère). Vers 1880, on vit émerger une nouvelle espèce appelée *Spartina anglica*, issue de *S. x townsendii*, et qui, cette fois, se reproduisait de façon sexuée, par l'intermédiaire de graines. *Spartina anglica* s'est rapidement propagée sur les côtes européennes et elle est aujourd'hui introduite sur plusieurs continents.



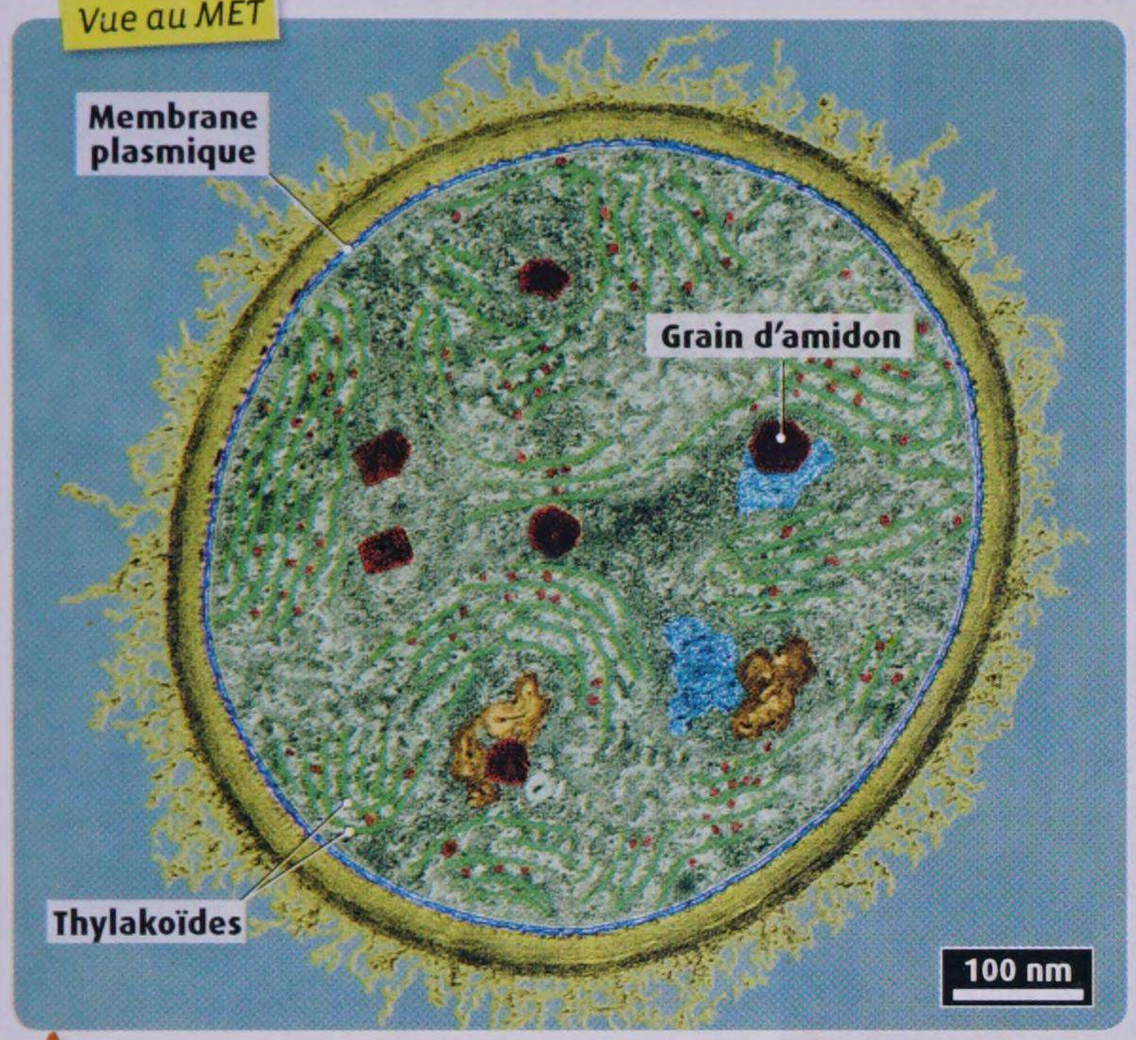
	Spartina maritima	*Spartina alterniflora*	*Spartina x townsendi*	*Spartina anglica*
Nombre de chromosomes	2n = 60	2n = 62	2n = 61	2n = 122

1 La naissance d'une nouvelle espèce.



2 Les hybridations chez les végétaux. Chez les végétaux, le pollen d'une espèce est fréquemment déposé sur le pistil d'une fleur d'une autre espèce. On observe ainsi occasionnellement l'apparition de plantes hybrides qui, le plus souvent, sont stériles et se maintiennent par reproduction asexuée. Parfois cependant, chez quelques individus hybrides, une méiose anormale provoque un doublement du nombre de chromosomes dans les cellules mères des gamètes : on parle de polyploïdisation. Méiose et reproduction sexuée deviennent alors possibles et l'hybride a donné naissance à une nouvelle espèce.

Des associations entre bactéries et eucaryotes

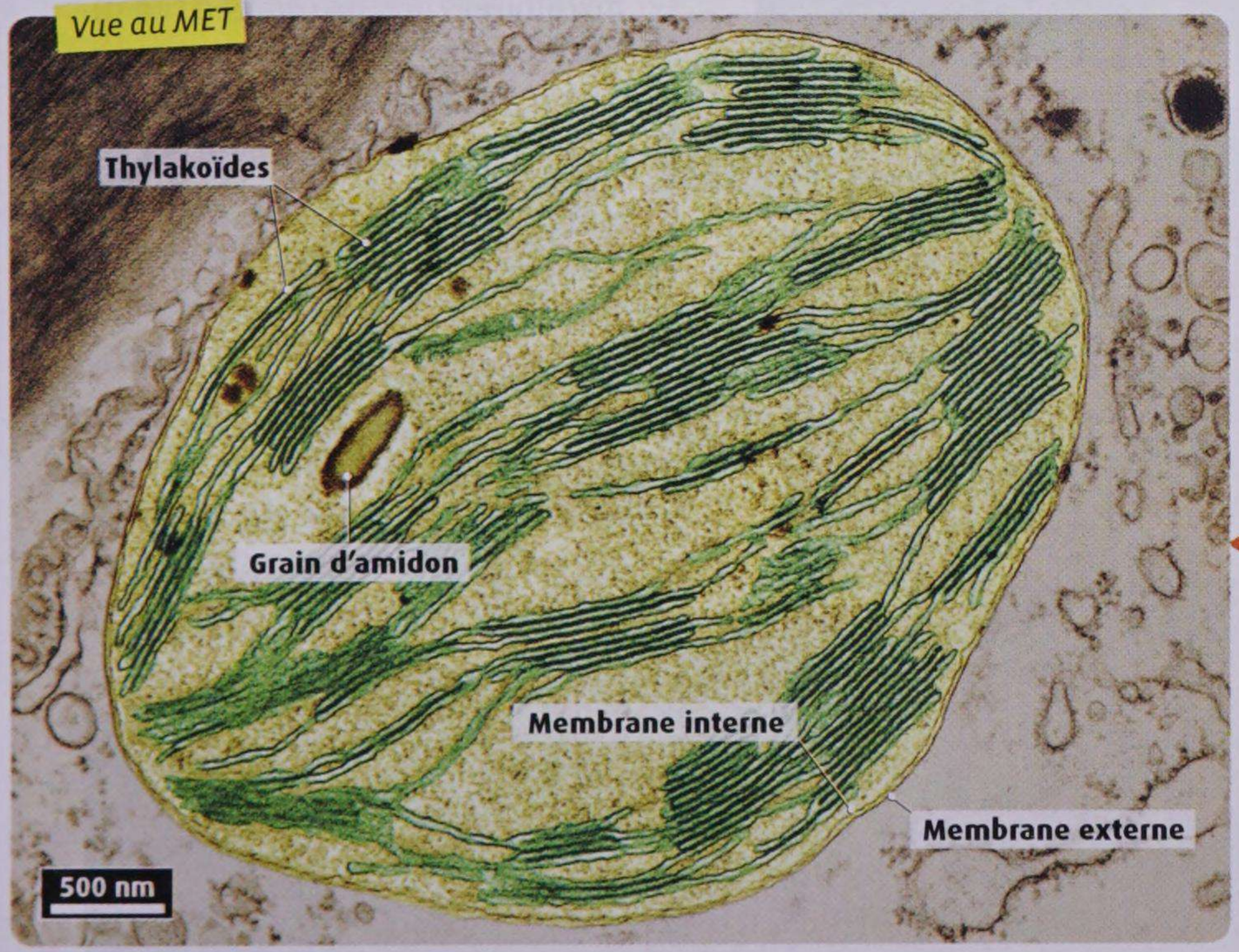


3 Une cyanobactérie. Ces bactéries aquatiques contiennent de la chlorophylle (dans la membrane des thylakoïdes) et réalisent la photosynthèse. Leur génome est constitué d'une molécule d'ADN circulaire. Les ARNm sont traduits par des ribosomes de même structure que ceux des cellules eucaryotes, mais de poids moléculaire inférieur (ribosomes « légers »).

Interview de **Alexandre Meinesz**, professeur à l'université de Nice Sophia Antipolis.

Selon la théorie de l'endosymbiose, les chloroplastes sont issus de cyanobactéries qui vivaient en symbiose dans le cytoplasme de cellules eucaryotes ancestrales (on parle d'endosymbiose). Parmi les arguments en faveur de cette théorie : les chloroplastes possèdent un petit génome avec des gènes homologues à des gènes bactériens et des pigments photosynthétiques localisés, comme chez les cyanobactéries, dans la membrane des thylakoïdes. Les chloroplastes ont perdu beaucoup de gènes par rapport à leurs ancêtres cyanobactériens (ceux permettant par exemple le déplacement de la cellule). Par ailleurs, des gènes essentiels à la photosynthèse ont été, au cours de l'évolution, transférés dans le noyau de la cellule eucaryote et le chloroplaste reçoit 90 % de ses protéines du cytoplasme. Il dépend donc du reste de la cellule : au fil de l'évolution, le symbiote cyanobactérien est devenu un organite.

4 La théorie de l'endosymbiose.



5 Le chloroplaste d'une cellule d'algue verte. Les membranes des thylakoïdes contiennent de la chlorophylle, qui permet la photosynthèse chez les plantes et les algues vertes notamment. Ils possèdent une petite molécule d'ADN circulaire contenant une centaine de gènes. Les ARNm de ces gènes sont traduits grâce à des ribosomes « légers » présents dans le chloroplaste même.

Vocabulaire

Thylakoïde : compartiment intracellulaire en forme de sac délimité par une membrane au niveau de laquelle se déroule la première phase de la photosynthèse.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 2.** Sur le modèle du doc. 2, proposez un scénario expliquant l'émergence de l'espèce *Spartina anglica*.
2. **DOC. 3 À 5.** Déterminez quelques arguments suggérant que le chloroplaste est issu d'une cyanobactérie intégrée au cytoplasme d'une cellule eucaryote.
3. **DOC. 3 À 5.** Précisez quel est le nouveau phénotype conféré à un eucaryote par l'acquisition une cyanobactérie endosymbiotique.
4. **EN CONCLUSION.** Expliquez comment des associations de génomes différents peuvent être à l'origine d'une diversification du vivant.

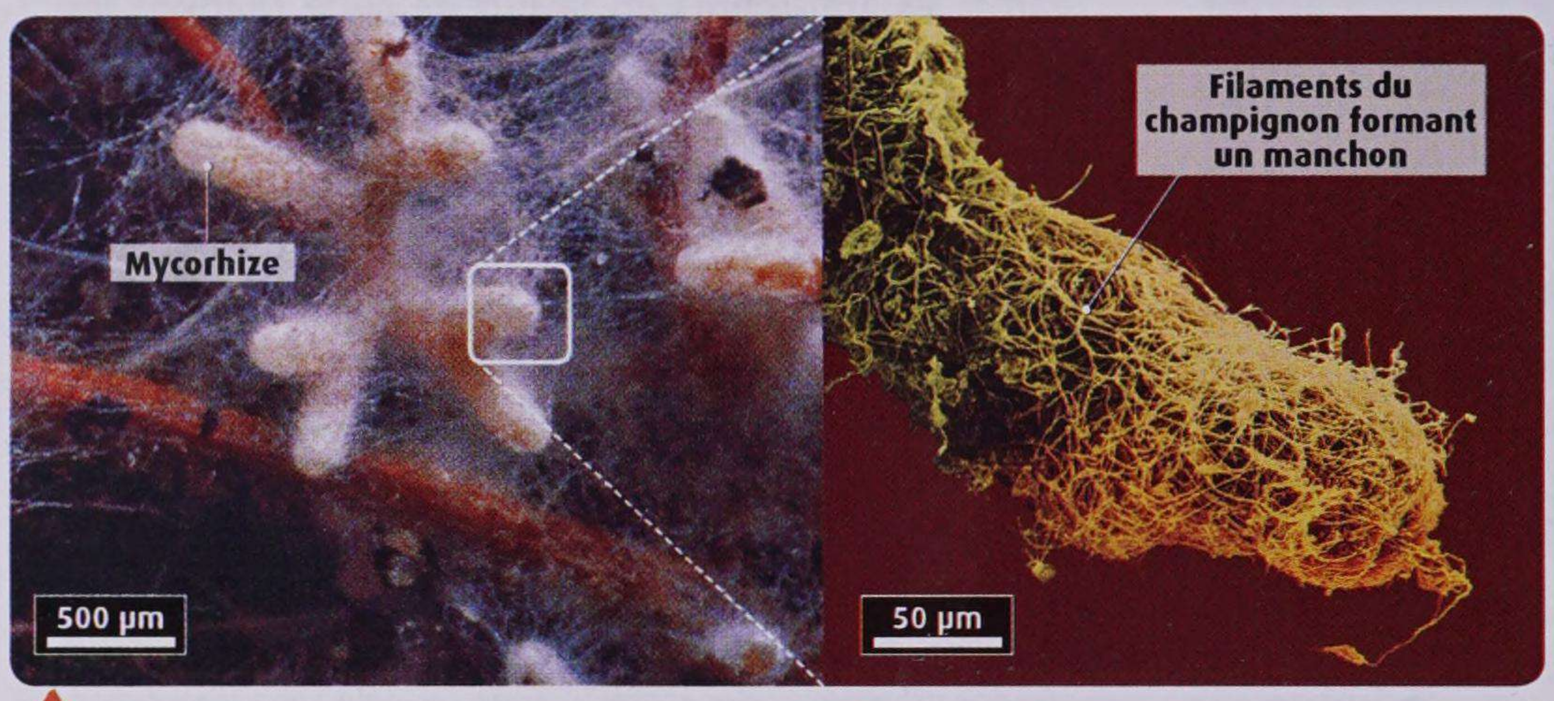
UNITÉ 4

Symbioses et diversification du vivant

Certains processus de diversification du vivant n'impliquent pas de modifications des génomes. C'est le cas lors des symbioses, des associations à bénéfice mutuel entre deux espèces différentes.

Comment les symbioses peuvent-elles être un facteur de diversification du vivant ?

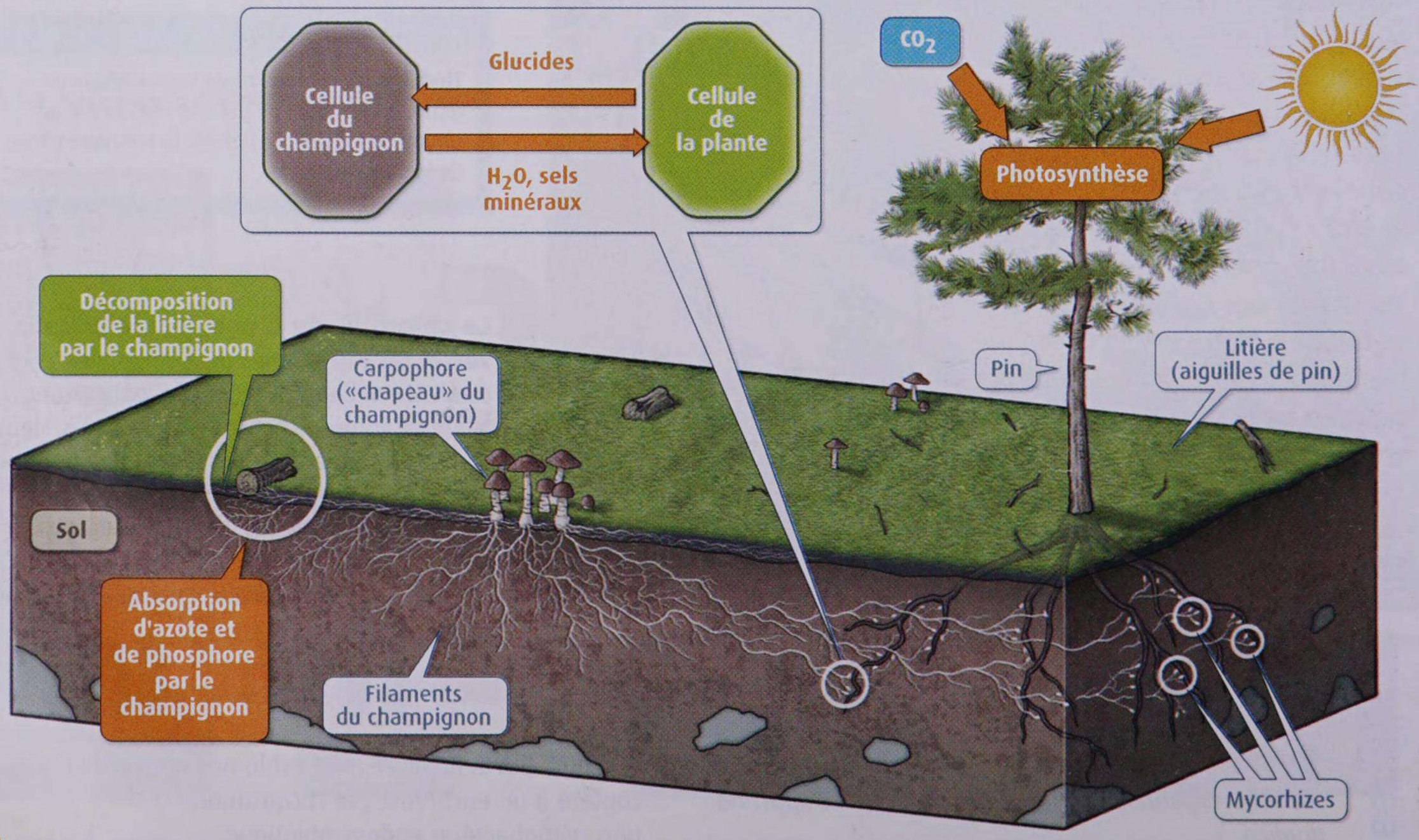
L'exemple des mycorhizes



1 De jeunes racines mycorhizées. On observe, dans les parties souterraines de nombreuses plantes, des structures mixtes associant racine du végétal et filaments d'un champignon vivant en symbiose avec le végétal : ce sont des mycorhizes. Elles sont constituées de manchons de filaments autour des racines les plus jeunes.

Plante	m_M	m_{NM}
Carotte	9,2	0,07
Pois	40,3	1,3
Poireau	11,9	0,5
Haricot	13,3	0,7
Fève	21,8	1,4
Maïs doux	166,5	45,5
Tomate	174,6	71,2
Pomme de terre	185,3	107,5
Blé	155,5	155,6

2 Masse moyenne de plants de différentes espèces en présence ou en l'absence de mycorhizes. m_M/m_{NM} : masse de la plante mycorhizée/non mycorhizée (en g).



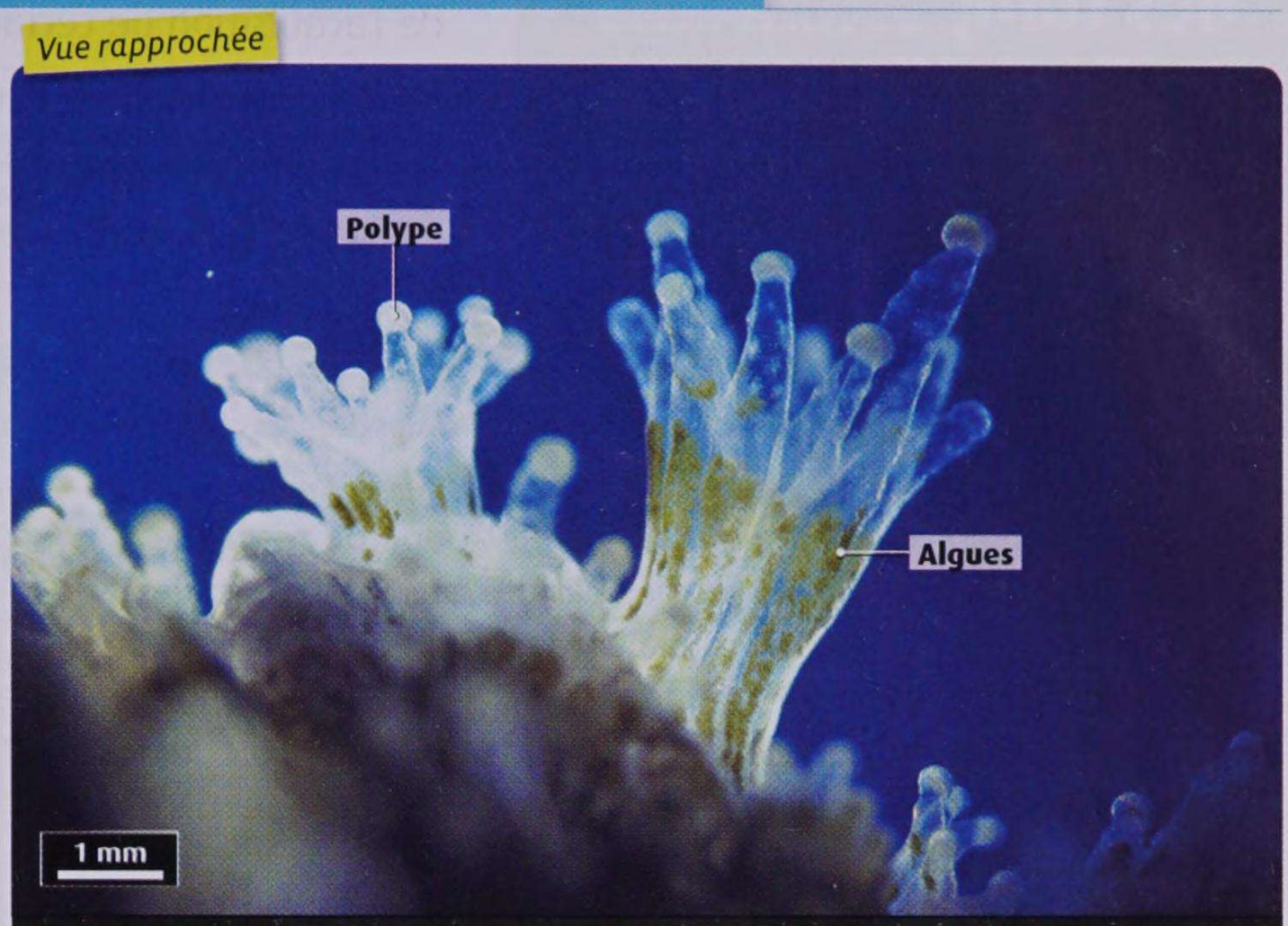
3 Les échanges entre une plante mycorhizée et le champignon impliqué dans les mycorhizes. La partie aérienne (visible) ne représente qu'une petite portion du champignon : celui-ci développe en effet un très important réseau souterrain de filaments, qui peut atteindre plusieurs mètres de longueur, et explore ainsi un grand volume de sol. La plupart des champignons forestiers sont impliqués dans des mycorhizes. Leur culture par l'Homme n'est pas encore maîtrisée.

L'importance écologique et évolutive des symbioses

Interview de **Marc-André Selosse**, biologiste.

La majorité des organismes sont symbiotiques. Par exemple, une vache ne digère pas l'herbe qu'elle ingère : des microorganismes peuplant une partie de son tube digestif se multiplient en se nourrrissant de cette herbe, tandis que la vache digère une fraction de ces microorganismes. Et neuf plantes sur dix exploitent les nutriments du sol grâce à des symbioses avec des champignons mycorhiziens qu'elles nourrissent en retour. Certaines s'adaptent à des sols pauvres ou toxiques (métaux lourds, etc.) à l'aide de champignons particuliers. La place des organismes dans les écosystèmes résulte donc souvent de symbioses. En additionnant leurs capacités, les partenaires occupent une place qu'aucun n'occuperait seul. Ainsi, les xanthelles et les coraux les abritant ne survivraient pas seuls dans les mers tropicales pauvres en nutriments. L'algue profite des déchets de l'animal, qui complète ses rares proies par les produits de la photosynthèse de l'algue : la symbiose crée alors un milieu original, le récif corallien. La symbiose permet aussi de nouvelles fonctions : dans les racines des légumineuses, comme le trèfle, des bactéries nourries par la plante transforment l'azote atmosphérique en azote assimilable par les deux partenaires. Ce métabolisme, qui fait de cette symbiose un « engrais vert », exige des conditions que les bactéries ne trouvent pas hors des plantes.

4 **Le rôle clé des symbioses.**



Les coraux vivent dans des eaux transparentes, pauvres en nutriments minéraux et en proies. Ils sont constitués de l'association symbiotique entre un animal, le polype, capable d'attraper de petites proies avec ses tentacules, et une algue unicellulaire (xanthelle) qui vit dans les cellules du polype et réalise la photosynthèse.

Les lichens vivent souvent dans des endroits pauvres en nutriments comme les rochers ou les écorces d'arbre. Ils sont constitués par l'association d'un champignon et d'une algue photosynthétique unicellulaire. Le champignon capte les eaux de pluie ou de ruissellement, et des minéraux. Les deux partenaires participent à la synthèse d'acides lichéniques, qui contribuent à donner leur couleur et leur toxicité aux lichens, les protégeant ainsi des trop fortes intensités lumineuses et des prédateurs.

5 **Quelques exemples de symbioses.**

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 3.** Discutez de l'importance des mycorhizes pour les plantes et pour les champignons.
2. **DOC. 2 ET 3.** Indiquez en quoi l'association de l'arbre avec un champignon mycorhizien modifie son phénotype. Cette modification apporte-t-elle des avantages aux deux partenaires ?
3. **DOC. 4 ET 5.** Expliquez comment les symbioses contribuent à la présence de la vie dans des milieux difficiles.
4. **EN CONCLUSION.** Montrez que les symbioses sont à l'origine d'une diversification du vivant.

UNITÉ 5

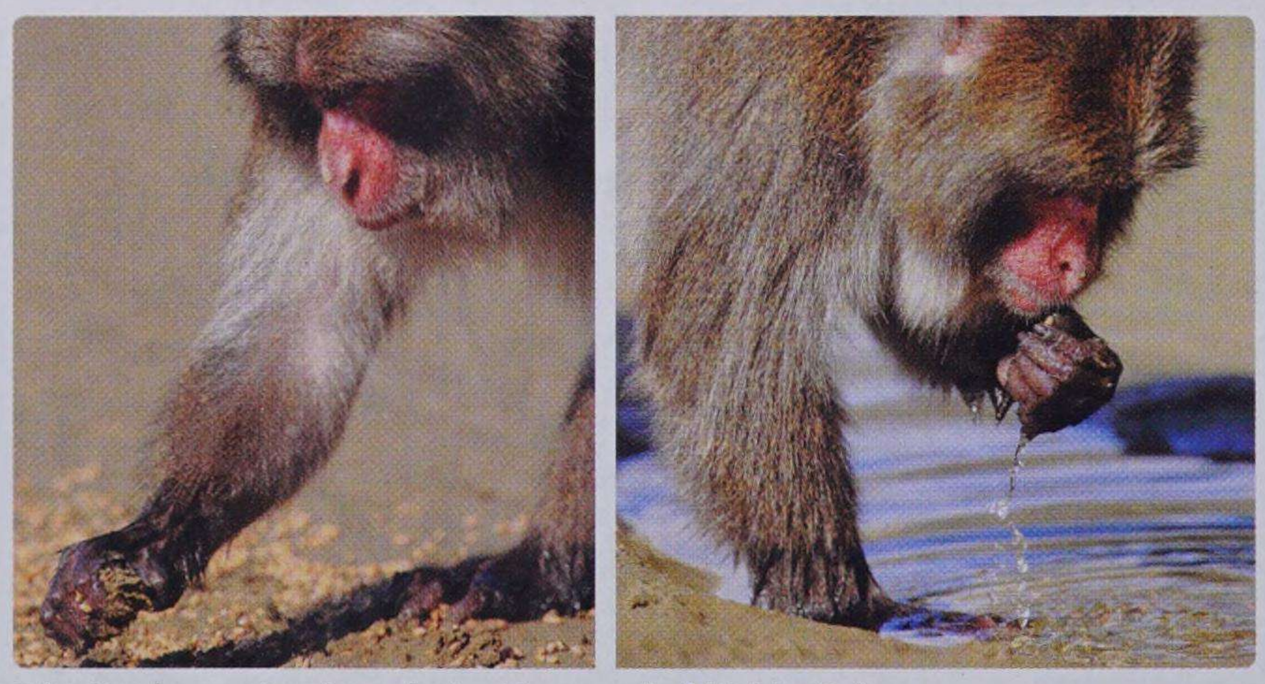
Diversification des comportements et diversification du vivant

De nombreux mécanismes non génétiques sont à l'origine d'une diversification du vivant. Ils sont à l'œuvre, par exemple, lors de l'acquisition de certains comportements chez les vertébrés.

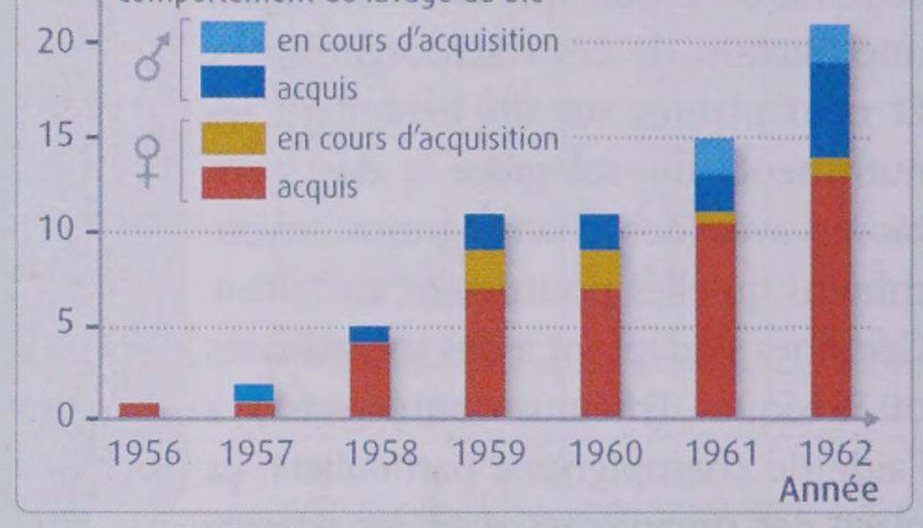
Comment une diversification des comportements peut-elle opérer indépendamment de facteurs génétiques ?

L'acquisition d'un comportement nouveau chez les macaques

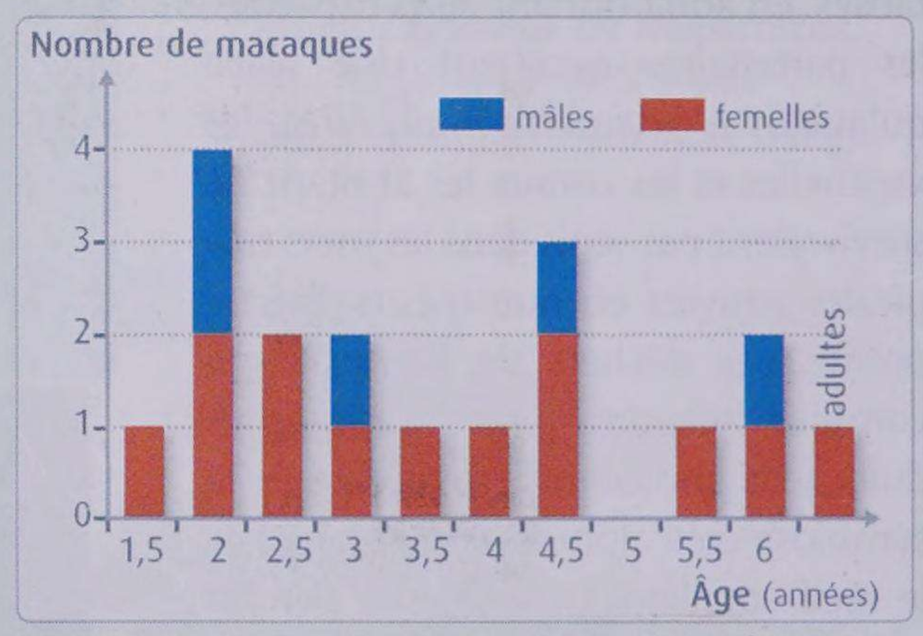
Au Japon, sur l'îlot de Koshima, une petite troupe de macaques japonais de 49 individus a été étudiée par des chercheurs dans les années 1950-1960. Ces derniers jetaient régulièrement des grains de blé sur la plage, que les macaques récoltaient un à un pour les manger. En 1956, une jeune femelle de 4 ans eut l'idée de prendre des poignées de sable et de grains mélangés, puis de les jeter dans l'eau de mer. Le sable tomba au fond de l'eau et les grains flottèrent : ces derniers étaient ainsi plus faciles à récolter. La pratique du lavage des grains blés s'est peu à peu répandue dans la population. Les chercheurs ont étudié les modalités de la transmission de ce nouveau comportement, observé dans aucune autre population de macaques japonais.



Récolte des grains (gauche) et lavage du blé (droite).

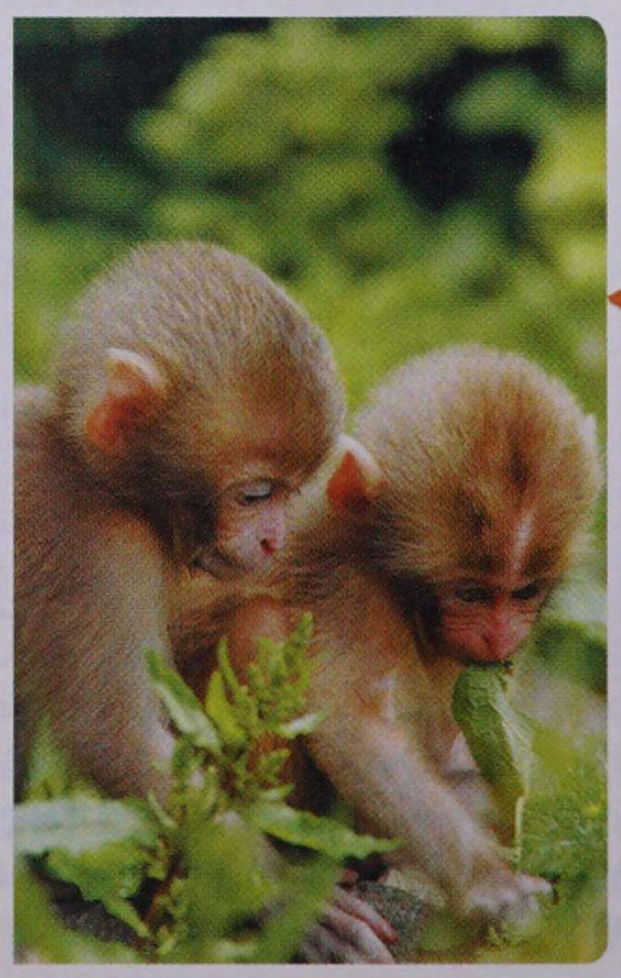


Nombre d'individus ayant appris le comportement de lavage du blé entre 1956 et 1962.



Âge d'acquisition du comportement de lavage du blé.

1 L'étude de la transmission d'un nouveau comportement dans une population de macaques japonais.



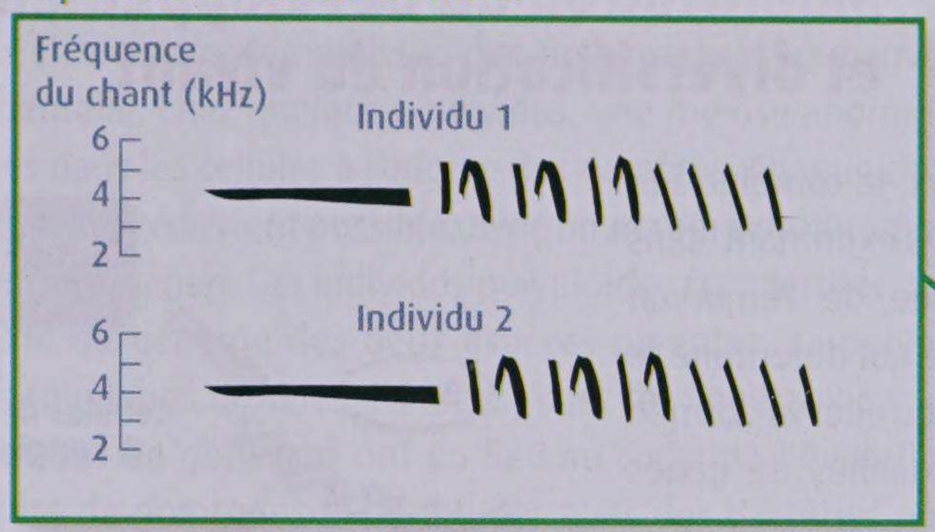
2 Les relations sociales chez les macaques japonais.
Les macaques vivent en groupe. Les mères ont des relations étroites avec leur petit, notamment au moment des repas, qu'ils prennent côte à côte. Vers 4 ans, les jeunes mâles prennent leur indépendance et ont beaucoup moins de relations avec les autres membres du groupe. Les petits passent beaucoup de temps ensemble, à jouer et à s'imiter les uns les autres sous le regard des mères.

L'acquisition du chant chez les bruants à couronne blanche

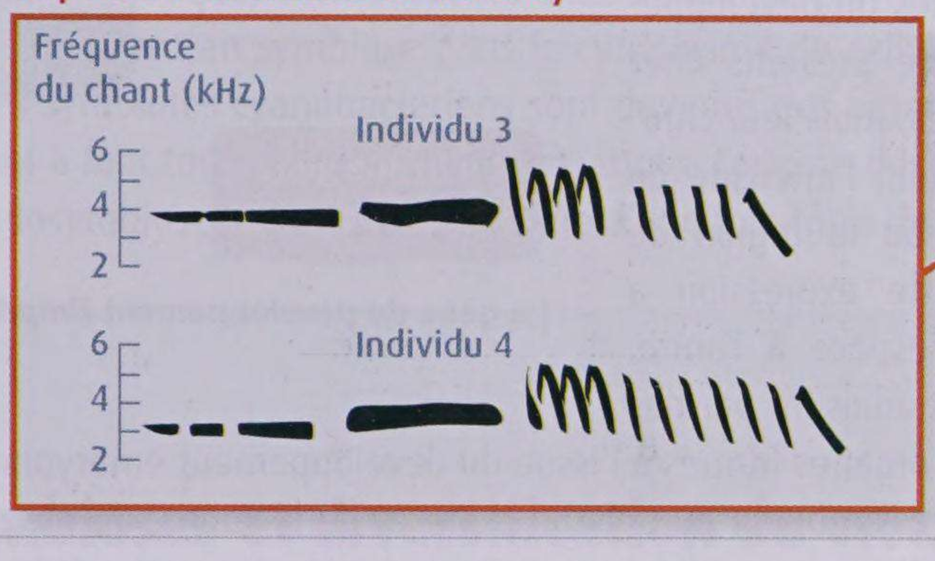
Bruant à couronne blanche

Sonogrammes

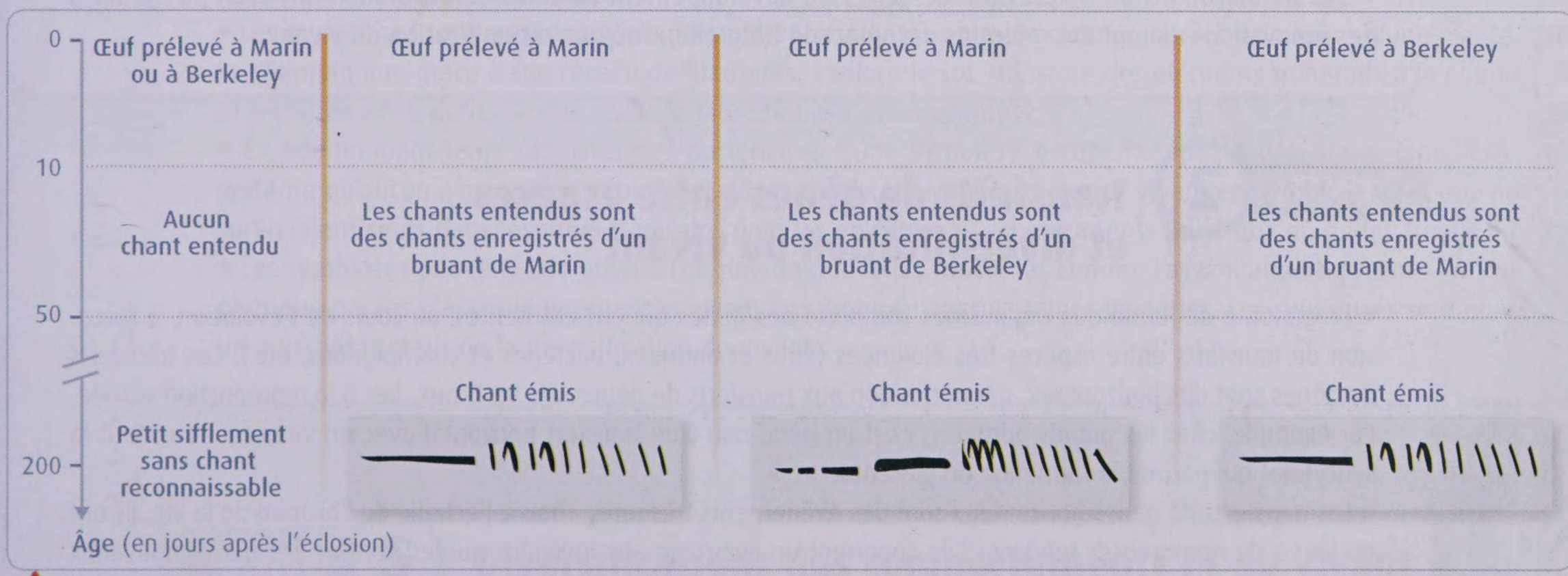
Population de bruants de Marin



Population de bruants de Berkeley



3 Les dialectes des bruants à couronne blanche. Autour de la baie de San Francisco, en Californie, vivent plusieurs populations de bruants à couronne blanche. Le chant des oiseaux de deux de ces populations a été étudié. Les sonogrammes qui sont figurés représentent les variations de la fréquence des ondes sonores au cours du chant.



4 L'apprentissage du chant chez le bruant à couronne blanche. Des chercheurs ont prélevé des œufs de bruants à couronne blanche soit dans la région de Marin, soit dans celle de Berkeley. Les oiseaux ont ensuite été élevés au laboratoire, sans contact avec d'autres individus de leur espèce. Entre 10 et 50 jours, les jeunes bruants ont entendu des chants d'oiseaux enregistrés. Les chercheurs ont analysé le chant des bruants une fois adultes.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** En justifiant votre réponse, proposez une explication au développement du comportement de lavage des grains de blé chez les macaques japonais de l'île de Koshima.

2 **DOC. 3 ET 4.** En justifiant votre réponse, indiquez quels sont les processus à la base de l'apprentissage du chant chez les bruants à couronne blanche.

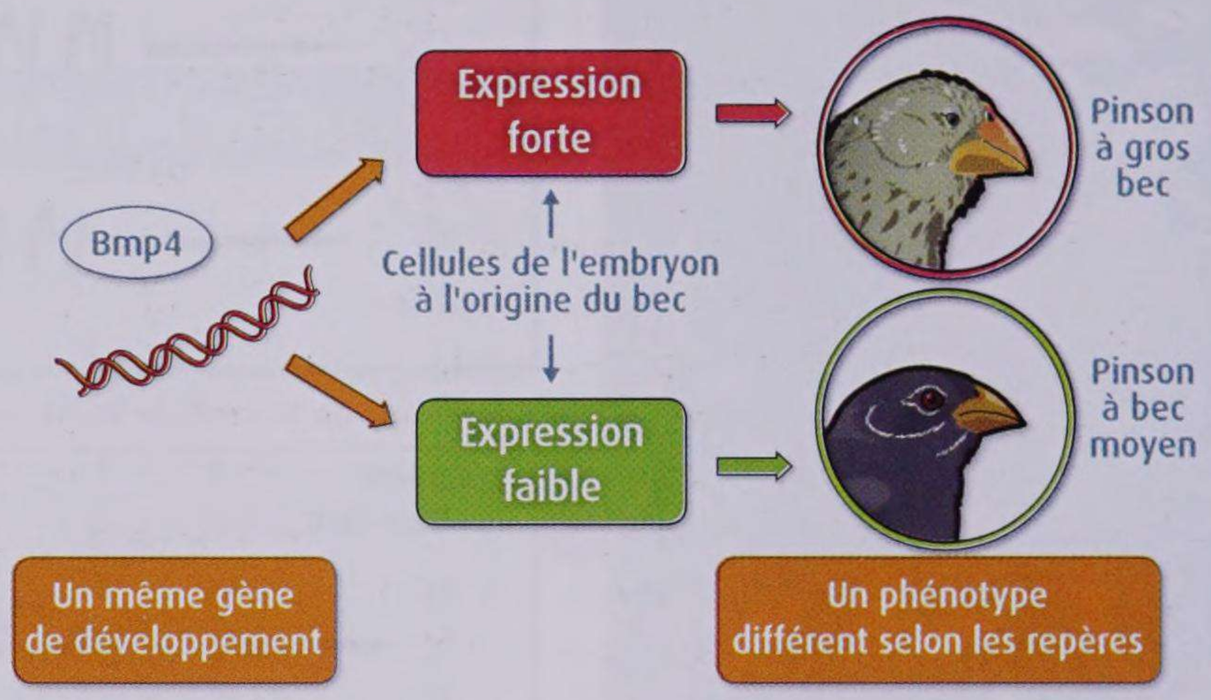
3 **EN CONCLUSION.** En vous appuyant sur l'exemple de la diversification des comportements, montrez qu'une diversification du monde vivant peut opérer indépendamment des facteurs génétiques.

La diversification du vivant

UNITÉ 1 Modification du développement et diversification du vivant

• Chez les animaux, la combinaison de certains gènes s'exprimant dans une région donnée de l'embryon est un élément clé qui détermine le tissu ou l'organe qu'elle va former. Ces gènes sont qualifiés de gènes du développement.

• Les mêmes gènes du développement peuvent être présents chez différentes espèces, mais leur chronologie d'expression, l'intensité de cette expression ou la région de l'embryon où cette expression a lieu varie d'une espèce à l'autre. Ces variations se traduisent par des modifications des organes formés à l'issue du développement embryonnaire. Par exemple, lors de la formation des membres chez l'embryon du poisson-zèbre et de la souris, on observe des variations de la localisation et de la chronologie d'expression d'un même gène du développement (*Hox D13*), aboutissant à la formation d'une nageoire dans un cas et d'une patte pourvue de doigts dans l'autre. Chez les pinsons des Galápagos, l'intensité de l'expression du gène de développement *Bmp4* dans l'embryon détermine la taille du bec.



Le gène du développement *Bmp4* et la taille du bec chez les pinsons.

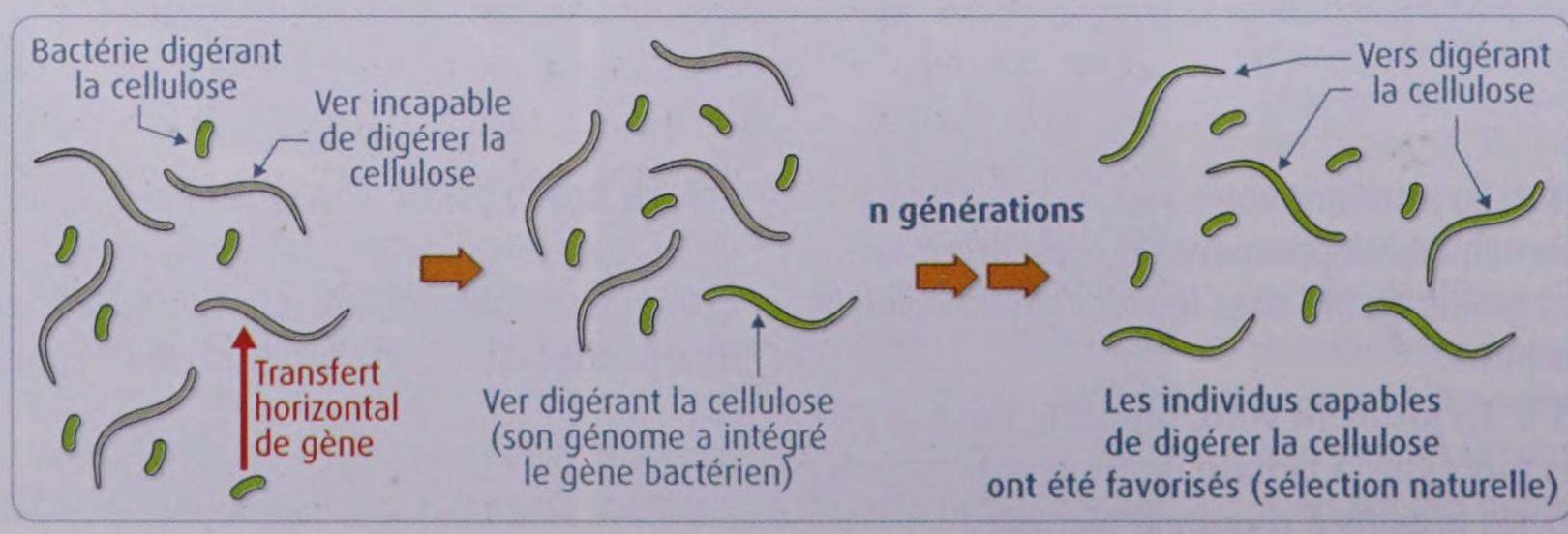
• Des modifications de l'expression de gènes du développement au cours de l'évolution ont ainsi pu mener à des innovations qui ont été retenues par sélection naturelle, d'où une diversification du vivant.

UNITÉ 2 Transferts de gènes entre espèces et diversification du vivant

• Le génome de nombreux organismes comporte des gènes qui ont été hérités, au cours de l'évolution, à l'occasion de transferts entre espèces très éloignées (virus et animaux, bactéries et champignons, etc.). Ces transferts de gènes sont dits horizontaux, par opposition aux transferts de gènes dits verticaux, liés à la reproduction sexuée. Par exemple, chez les grands primates, c'est un gène issu d'un transfert horizontal avec un virus (gène codant la syncytine) qui permet la formation du placenta.

• Les transferts de gènes horizontaux sont des événements très rares, mais à l'échelle de l'histoire de la vie, ils ont eu lieu à de nombreuses reprises. S'ils apportent un avantage aux individus qui les portent, les gènes nouveaux acquis par transfert horizontal sont favorisés par la sélection naturelle et peuvent se répandre chez tous les individus de l'espèce concernée, qui acquiert de la sorte un nouveau caractère. Ainsi, plusieurs espèces animales ont acquis la capacité de digérer ou de synthétiser la cellulose à l'aide d'un gène transmis accidentellement par des bactéries.

• Les transferts de gènes entre espèces différentes participent donc à la diversification du vivant.



L'acquisition d'un nouveau caractère par transfert horizontal de gène chez des vers nématodes.

UNITÉ 3 Association de génomes et diversification du vivant

• Chez les plantes, les hybridations entre individus d'espèces différentes sont fréquentes. Les individus hybrides sont généralement stériles (les chromosomes issus des deux parents ne peuvent s'apparier et la méiose est impossible). De façon accidentelle, chez quelques individus, une méiose anormale peut induire un doublement du nombre de chromosomes dans les cellules à l'origine des gamètes. Chaque chromosome peut alors s'apparier avec son homologue et la méiose redevient possible, avec un nombre de chromosomes deux fois plus élevé. On appelle ce phénomène polyploïdisation. Les individus polyploïdes sont fertiles. Ils appartiennent à une nouvelle espèce végétale qui a hérité du génome des deux espèces parentes. La polyploïdisation est ainsi à l'origine d'une diversification rapide (quelques dizaines d'années) chez les végétaux.

• D'autres modes d'associations de génomes ont eu lieu au cours de l'évolution. Ainsi, les chloroplastes des cellules végétales présentent de nombreuses similitudes avec des bactéries photosynthétiques (cyanobactéries). Selon la théorie endosymbiotique, cette ressemblance s'explique par le fait que les chloroplastes sont issus de cyanobactéries qui vivaient en symbiose dans le cytoplasme de cellules eucaryotes ancestrales (on parle d'endosymbiose). Ces symbiotes cyanobactériens sont devenus des organites et les cellules eucaryotes qui les abritaient, devenant à leur tour photosynthétiques, sont à l'origine des différents groupes d'algues et de plantes terrestres. L'endosymbiose a donc été à l'origine d'une très forte diversification du monde vivant.

UNITÉ 4 Symbioses et diversification du vivant

• Des individus appartenant à des espèces différentes peuvent vivre en association étroite. On appelle symbiose ces associations qui bénéficient aux deux partenaires en interaction. Elles doivent, le plus souvent, être renouvelées à chaque génération.

• Les mycorhizes sont ainsi des symbioses plutôt fréquentes entre un champignon et les racines d'une plante. Le champignon, grâce à son réseau de filaments, explore le sol, transfère des éléments minéraux à la plante et reçoit de cette dernière des glucides fabriqués par photosynthèse.

• En additionnant leurs capacités, les partenaires d'une symbiose occupent souvent une place dans l'écosystème qu'aucun n'occuperait seul. Ainsi, ni les coraux, ni les algues vertes vivant en symbiose avec eux ne survivraient seuls dans les mers tropicales pauvres en proies et en nutriments minéraux où on les trouve.

• Les symbioses peuvent être aussi à l'origine de nouvelles fonctions, comme l'assimilation de l'azote atmosphérique par les plantes légumineuses vivant en symbiose avec certaines bactéries. Les symbioses sont donc un puissant moteur de la diversification du vivant.

UNITÉ 5 Diversifications des comportements et du vivant

• Chez les mammifères et chez les oiseaux, une diversification des comportements peut opérer sans modification du génotype. Ainsi :

– en apportant du blé à une population de macaques japonais, on a constaté l'apparition d'un comportement nouveau (le lavage du blé) qui, par imitation, s'est répandu parmi les membres du groupe. De la sorte, cette population a acquis durablement un comportement qui la différencie des autres populations de macaques n'ayant pas accès au blé. L'apprentissage du comportement nouveau par imitation fut surtout le fait des jeunes (moins de 5 ans), qui s'imitent entre eux et imitent les adultes, et des femelles (passant beaucoup plus de temps en groupe que les mâles).

– chez les bruants à couronne blanche, des populations d'origine géographique distincte ont des chants différents. Ces « dialectes » ne sont pas hérités génétiquement, mais appris : les oisillons imitent les chants qu'ils entendent entre l'âge de 10 à 50 jours.

• Un comportement peut donc se transmettre de génération en génération dans une population par voie non génétique (apprentissage par imitation) et être à l'origine d'une diversification du vivant.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2

La diversification du vivant

L'essentiel par le texte

Des modifications du génome

• Au-delà des mutations et du brassage génétique associé à la méiose et fécondation, des différences d'expression de **gènes du développement** peuvent être à l'origine de variations de caractères phénotypiques (taille du bec chez les oiseaux par exemple). Au cours de l'évolution, des modifications de l'expression de gènes du développement ont pu ainsi être à l'origine de l'apparition de caractères phénotypiques nouveaux et contribuer à la diversification du vivant.

• Au cours de l'évolution, le génome de nombreuses espèces s'est enrichi de gènes nouveaux provenant d'autres espèces. Les transferts de gènes entre espèces différentes (**transferts de gènes horizontaux**) sont à l'origine de l'acquisition de caractères phénotypiques nouveaux.

Des associations de génomes

• Chez les végétaux, il arrive fréquemment que des individus appartenant à des espèces différentes puissent se reproduire entre eux, formant ainsi des **hybrides interspécifiques**. Ces hybrides sont parfois à l'origine de nouvelles espèces.

• D'autres modes d'association de génomes ont eu lieu au cours de l'évolution. Ainsi, des cellules eucaryotes ancestrales ont intégré des bactéries photosynthétiques qui vivaient en **symbiose** avec elles dans leur cytoplasme. Les chloroplastes des cellules des algues et des plantes terrestres dériveraient de ces bactéries symbiotiques.

Des diversifications du vivant sans modifications des génomes

• Les **symbioses** sont des associations étroites entre deux individus appartenant à des espèces différentes, qui doivent être renouvelées à chaque génération. Les organismes partenaires au sein d'une symbiose ont un phénotype très différent lorsqu'ils sont seuls et lorsqu'ils sont associés dans la symbiose, sans pour autant que leur patrimoine génétique ait été modifié. Les symbioses sont ainsi un puissant moteur de la diversification du vivant qui n'implique pas de modifications des génomes.

• Chez les vertébrés, certains comportements nouveaux se transmettent de génération en génération au sein d'une population par voie non génétique (apprentissage par imitation). Au cours de leur histoire, les différentes populations d'une même espèce n'ont pas acquis de la sorte les mêmes comportements. L'apprentisage par imitation est ainsi à l'origine d'une diversification du vivant sans modifications des génomes.

Les capacités et attitudes

▸ Interpréter un changement évolutif en terme de modification du développement **(unité 1)**

▸ Étudier des modalités de modification du génome **(unité 2)**

▸ Recenser des informations et raisonner pour élaborer un scénario d'émergence d'une nouvelle espèce **(unité 3)**

▸ Étudier des exemples de modifications du vivant sans modifications de génomes **(unités 4 et 5)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

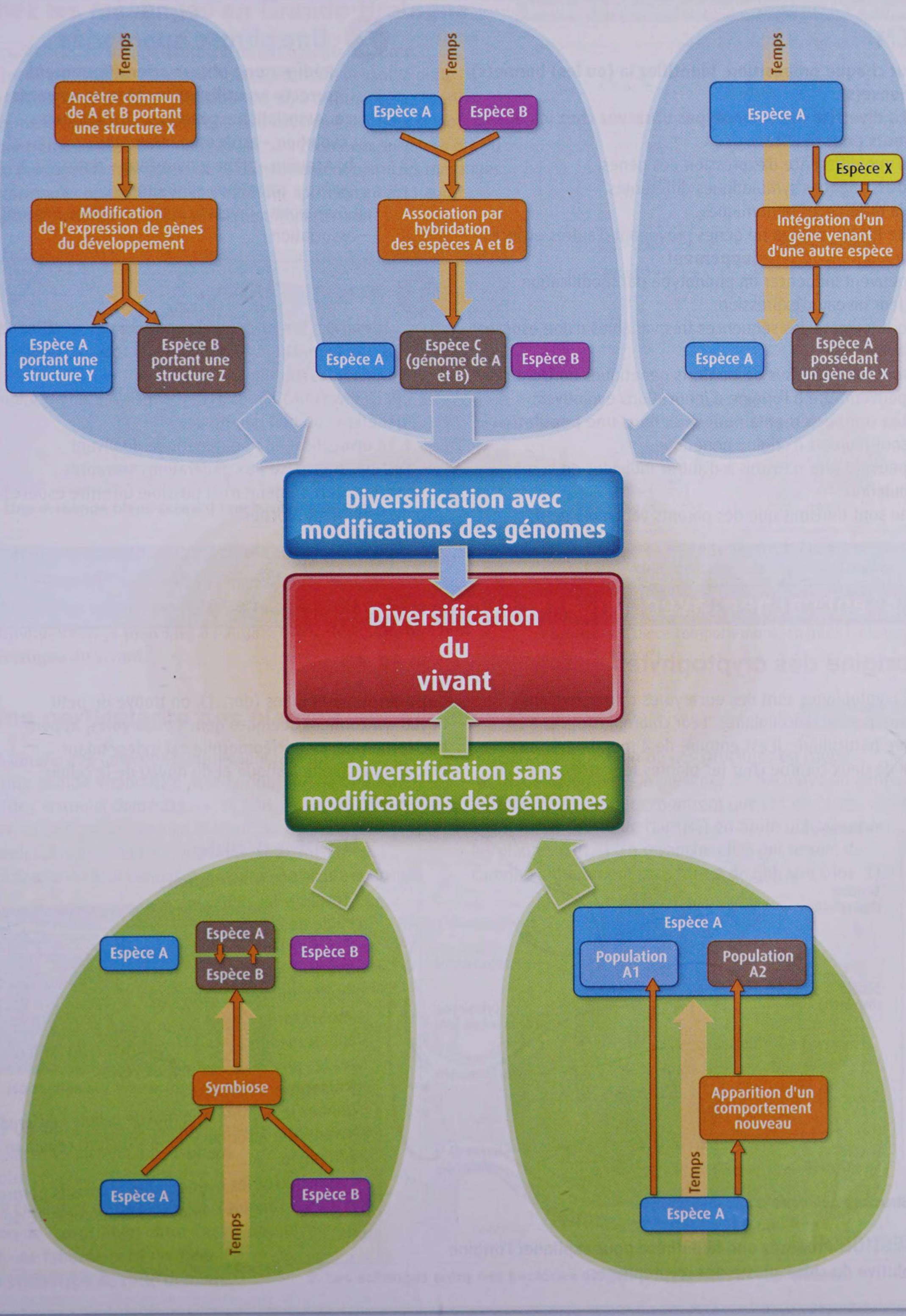
Gène du développement : gène jouant un rôle important dans la mise en place d'organes au cours de développement de l'embryon.

Hybride interspécifique : individu issu d'un croisement entre deux individus appartenant à des espèces différentes. Un tel hybride est généralement stérile. Un doublement du nombre de chromosomes (polyploïdisation) peut survenir au cours de la méiose chez certains individus hybrides. La polyploïdisation rend la production de gamètes possible. L'hybride devient ainsi fertile et constitue une nouvelle espèce. Le phénomène est fréquent chez les végétaux.

Symbiose : interaction à bénéfice mutuel entre deux êtres vivants appartenant à des espèces différentes.

Transfert de gène horizontal : transfert naturel d'un gène d'une espèce vers une autre, parfois très éloignée. Il est fréquent entre espèces de bactéries.

L'essentiel par l'image



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La diversité des phénotypes observés chez les êtres vivants peut résulter :

a. d'une différence d'expression des gènes.
b. d'associations symbiotiques différentes.
c. de différences génomiques.
d. de l'incorporation de gènes provenant d'autres espèces.

2. Les gènes du développement :

a. peuvent influencer un phénotype par modification de leur niveau d'expression.
b. ont toujours des séquences très variables d'une espèce à l'autre.
c. sont toujours issus de tranferts génétiques horizontaux.
d. peuvent être à l'origine d'innovations évolutives.

3. Les comportements nouveaux dans une population :

a. sont toujours d'origine génétique.
b. peuvent être transmis à d'autres individus de la même population.
c. ne sont transmis que des parents vers leurs petits.

2 Une phrase appropriée

Rédigez une phrase scientifiquement correcte en utilisant les termes suivants :

a. Association – génomes – hybridation – évolution – espèces – différentes.
b. Acquérir – gène – nouveaux – autre – espèce – caractères – intégration.
c. Symbiose – diversification – génome – vivant – association.

3 Vrai ou faux

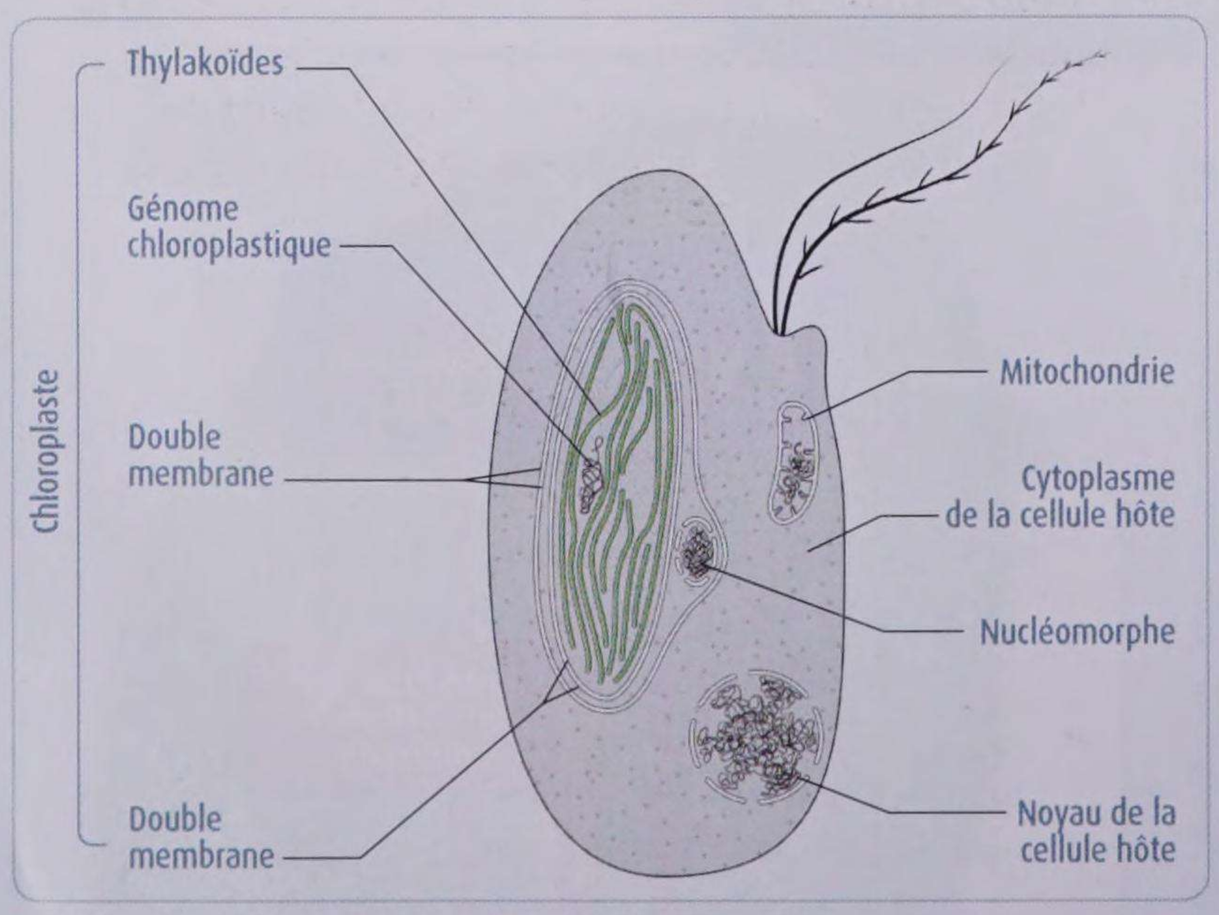
Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Les innovations génétiques ont toujours pour origine des mutations.
b. La diversification du vivant peut avoir une origine génétique ou non génétique.
c. La diversification non génétique du vivant n'est pas transmise aux générations suivantes.
d. Le transfert de gène n'est possible qu'entre espèces génétiquement proches.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 L'origine des cryptophytes

Les cryptophytes sont des eucaryotes chlorophylliens, aquatiques et unicellulaires. Leur chloroplaste a une allure particulière : il est entouré de 4 membranes au lieu de deux comme chez les plantes terrestres. Intercalé entre ces 4 membranes (doc. 1), on trouve un petit noyau qui contient quelques gènes eucaryotes, appelé nucléomorphe. Ce nucléomorphe est indépendant du génome chloroplastique et du noyau de la cellule.



1. Structure cellulaire d'une cryptophyte.

QUESTION Proposez une hypothèse pour expliquer l'origine évolutive du chloroplaste des cryptophytes.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

– Localisez les différents génomes visibles dans une cellule de cryptophyte.
– Précisez leur origine eucaryote ou procaryote.
– Précisez le nombre de membrane séparant chaque génome du milieu extérieur.

• Mobiliser ses connaissances

Rappelez les mécanismes à l'origine des chloroplastes chez les plantes et les algues vertes.

• Raisonner et conclure

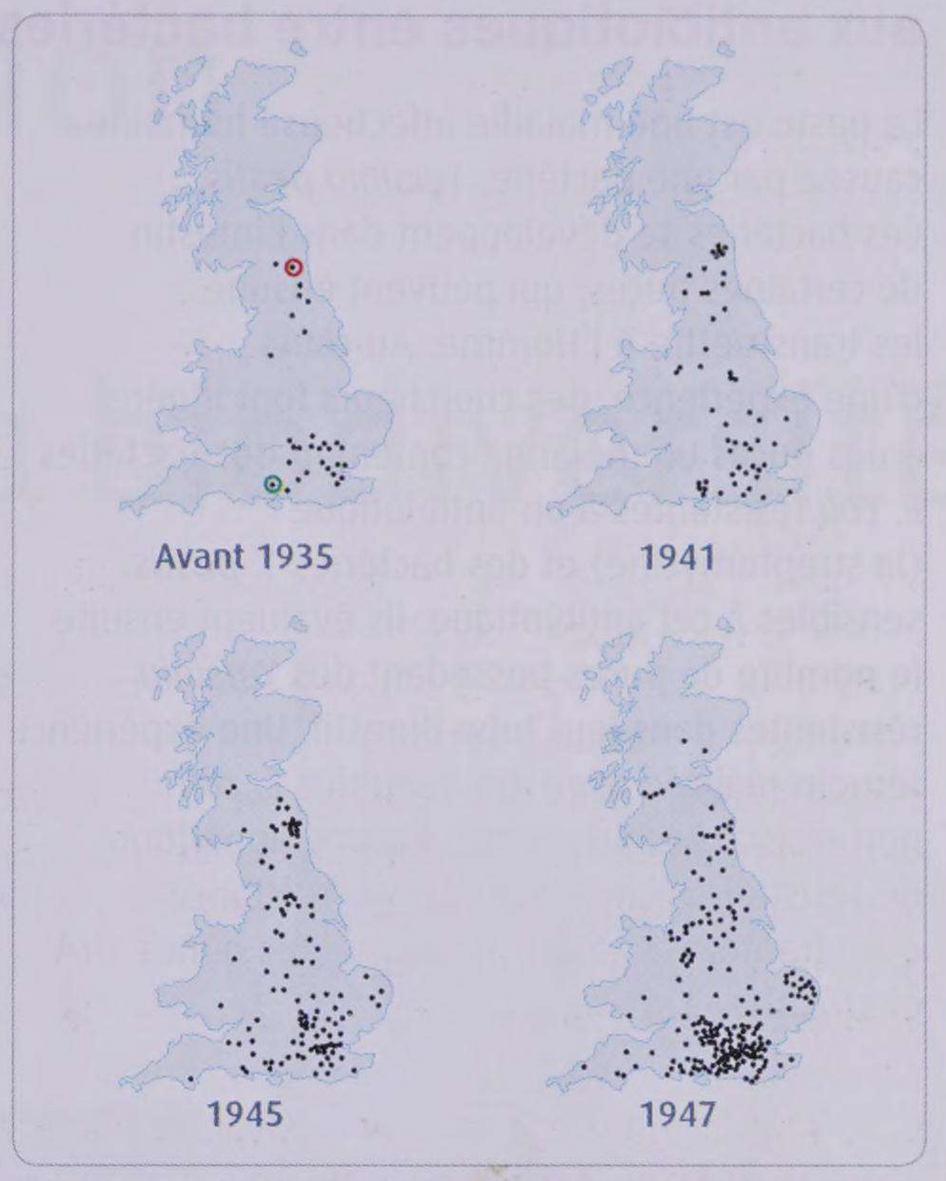
– Donnez le nombre minimal de cellules différentes pouvant être à l'origine de la structure cellulaire d'une cryptophyte.
– Reconstruisez les événements successifs permettant d'expliquer l'origine évolutive du chloroplaste de cryptophyte.

5 Un nouveau comportement chez les mésanges en Grande-Bretagne

Mettre en relation des informations et formuler une hypothèse

Au XXe siècle, en Grande-Bretagne, le lait frais était déposé le matin par le laitier dans une bouteille fermée devant la porte des habitations. Dans les années 1920, on a commencé à observer des mésanges qui ouvraient l'opercule des bouteilles pour se nourrir de la crème formée en surface du lait. Les 25 années suivantes ont vu une propagation très rapide de ce comportement parmi les mésanges anglaises. En outre, on a vu des individus appartenant à 11 autres espèces d'oiseaux pratiquer le même comportement.

1. Une mésange bleue ouvrant une bouteille de lait.



2. Propagation du comportement d'ouverture des bouteilles de lait chez les mésanges en Grande-Bretagne entre 1935 et 1947. Les points entourés correspondent aux localisations des premières observations de ce comportement, en 1921 (orange) et en 1926 (vert).

❶ Proposez et discutez les hypothèses pouvant expliquer l'apparition et la propagation rapide de ce nouveau comportement.

❷ Expliquer en quelques phrases comment un changement d'environnement peut être à l'origine d'une diversification non génétique du vivant.

6 Une particularité des plantes légumineuses

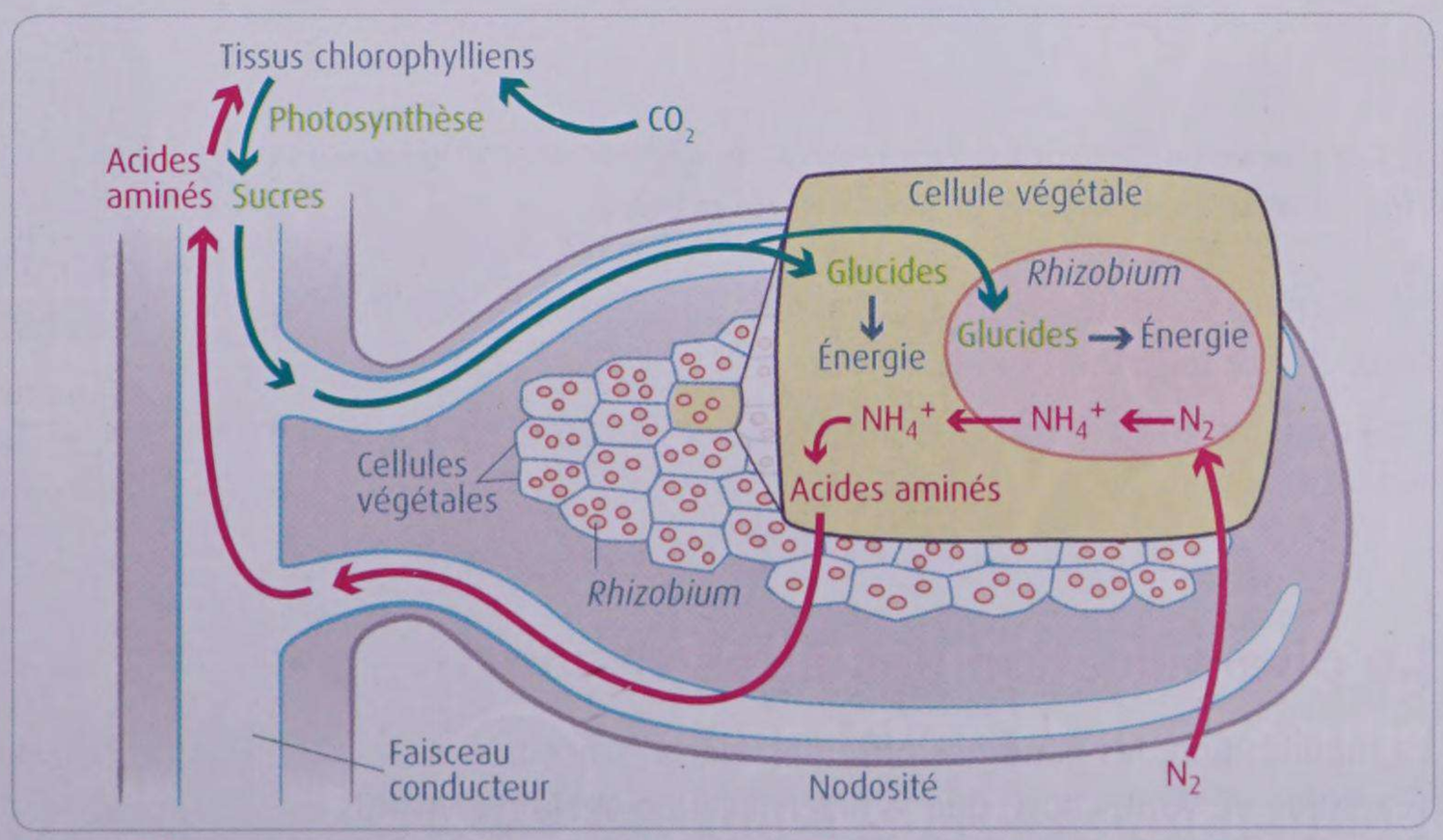
Saisir des informations

La famille des fabacées (plantes légumineuses) a une grande importance pour la nutrition de l'Homme et des animaux domestiques. Le pois, le haricot et le trèfle, qui en font partie, sont en effet riches en protéines (molécules azotées). Les légumineuses présentent au niveau de leur racines des renflements : les nodosités (doc. 1). L'observation de ces structures en coupe microscopique révèle la présence de bactéries du genre *Rhizobium*. Des études montrent que ces bactéries savent transformer l'azote de l'air (N_2) en azote utilisable par les plantes (NH_4^+). En revanche elles ont besoin de carbone, notamment sous forme de glucides (doc. 2).

1. Nodosités sur les racines de pois.

❶ Qualifiez cette association entre deux êtres vivants, en justifiant votre réponse.

❷ Expliquez en quoi l'existence ou non de l'association entre *Rhizobium* et une fabacée peut modifier le phénotype de cette dernière.



2. Les échanges entre des bactéries du genre *Rhizobium* et une fabacée.

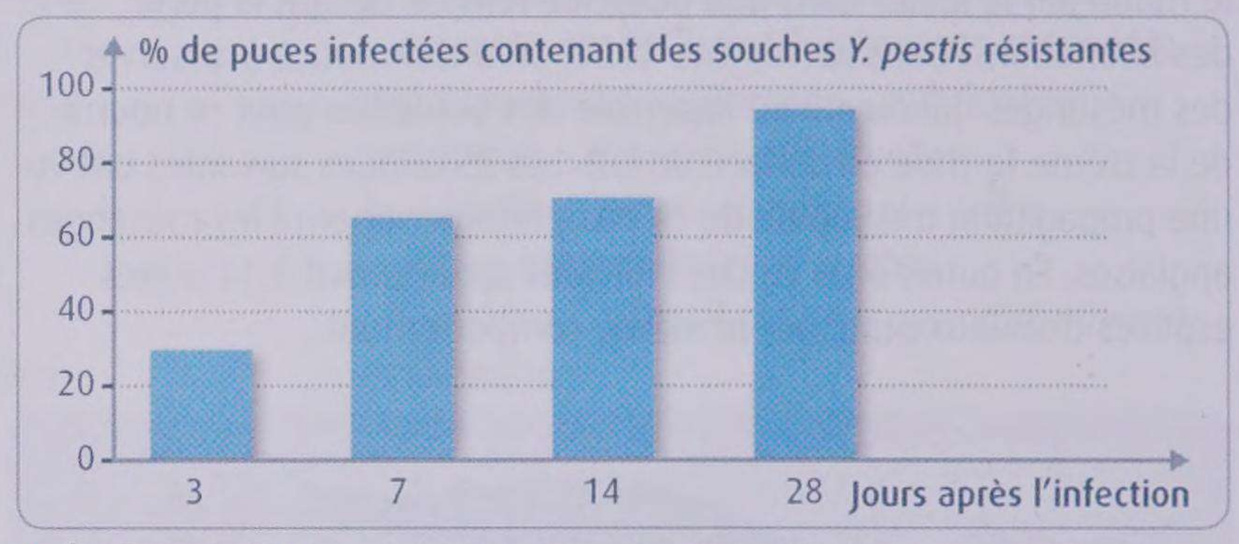
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

7 La transmission de la résistance aux antibiotiques entre bactéries

Analyser des données et les mettre en relation avec ses connaissances

La peste est une maladie infectieuse humaine causée par une bactérie, *Yersinia pestis*. Ces bactéries se développent dans l'intestin de certaines puces, qui peuvent ensuite les transmettre à l'Homme. Au cours d'une expérience, des chercheurs font ingérer à des puces un mélange contenant des bactéries *E. coli* résistantes à un antibiotique (la streptomycine) et des bactéries *Y. pestis* sensibles à cet antibiotique. Ils évaluent ensuite le nombre de puces possédant des *Yersinia* résistantes dans leur tube digestif. Une expérience témoin réalisée avec des bactéries *E. coli* non résistantes ne montre aucune apparition de résistances chez *Yersinia*. La résistance à la streptomycine est portée par les gènes *strA* et *strB* chez *E. coli*.



1. Évolution de la population de puces infectées contenant des souches de *Y. pestis* résistantes à la streptomycine.

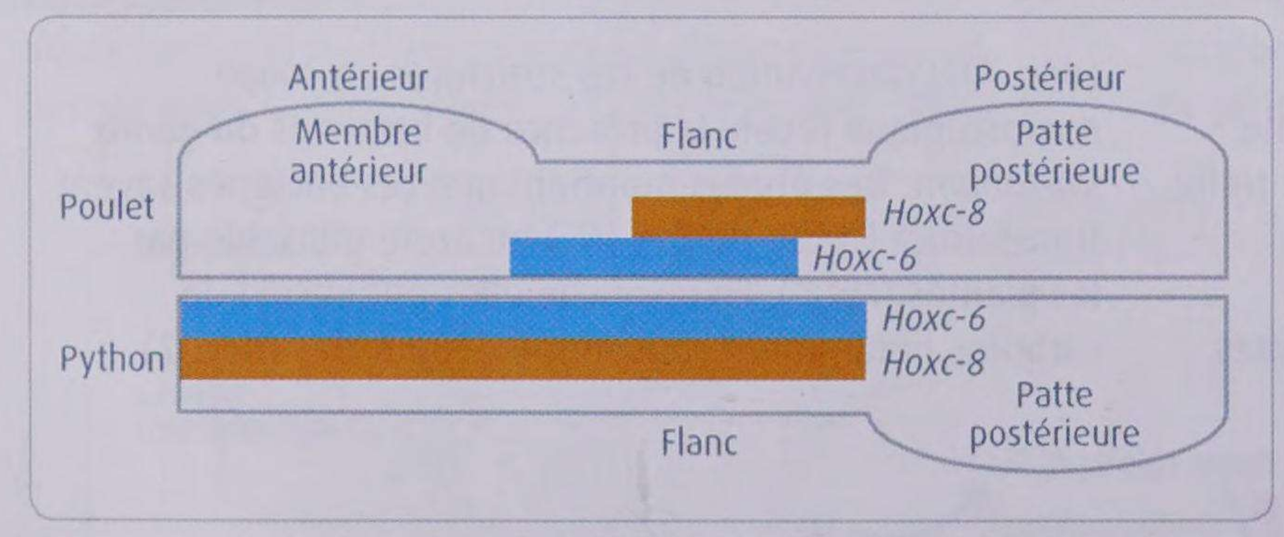
❶ Énoncez une hypothèse expliquant l'apparition des bactéries *Y. pestis* résistantes et montrez que cette étude offre un exemple de diversification génétique du vivant.

❷ Envisagez les conséquences de ce résultat sur la santé publique.

8 Les pattes des serpents

Analyser des données et raisonner

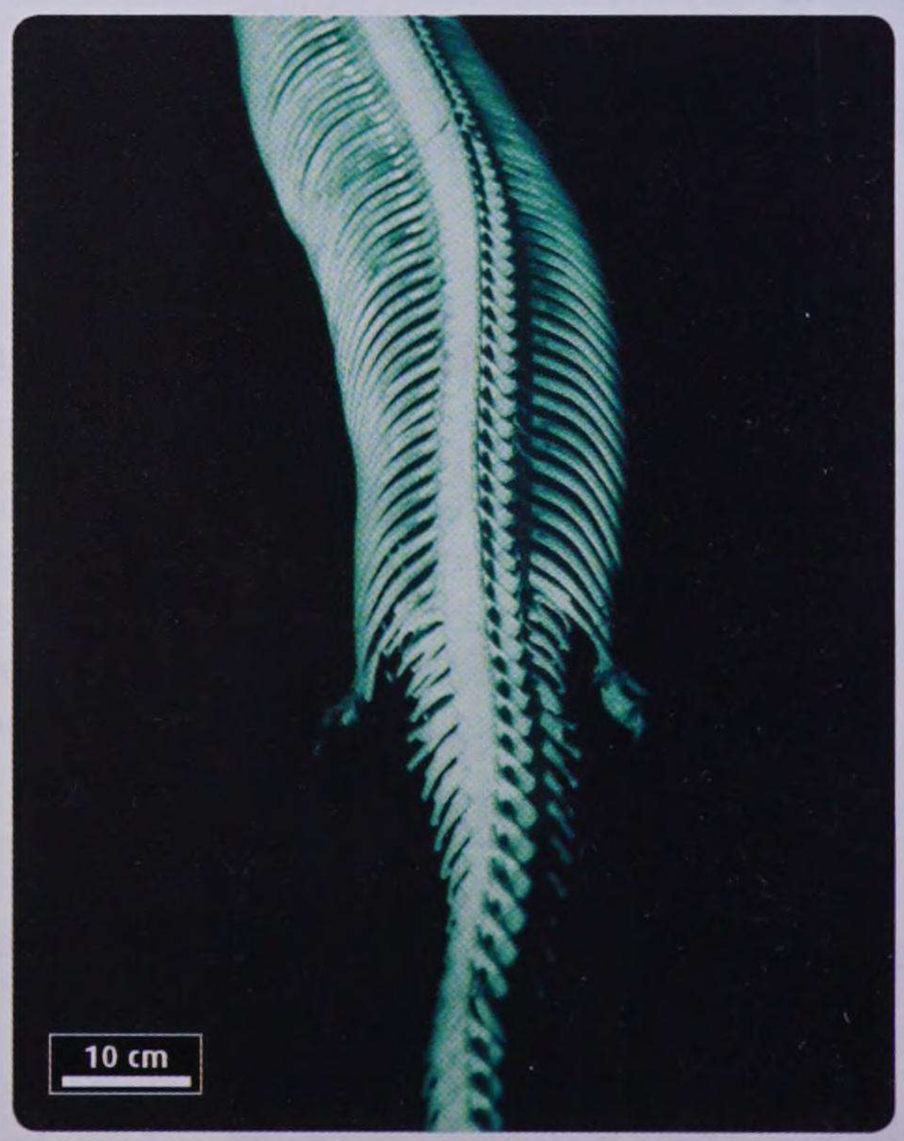
Les serpents sont des vertébrés ayant parfois de petits membres postérieurs, mais jamais de membres antérieurs. La formation d'un membre antérieur chez les embryons des autres vertébrés s'effectue en avant d'une zone où le gène *Hoxc-6* est exprimé seul, sans *Hoxc-8*. Quand ils sont exprimés ensemble, ces gènes sont impliqués dans la formation des côtes sur les vertèbres.



1. Comparaison des zones d'expression du gène *Hoxc-6* et du gène *Hoxc-8* chez les embryons de poulet et de python.

❶ Décrivez les différences d'expression du gène *Hoxc-6* et du gène *Hoxc-8* chez le python et le poulet.

❷ Envisagez la (les) conséquence(s) de ce changement sur le plan évolutif.



2. Le squelette du python. Chez les serpents, toutes les vertèbres ont des côtes. Les pythons possèdent deux pattes postérieures atrophiées.

9 La diversification des êtres vivants

Rédiger une synthèse

La modification des génomes offre des mécanismes très variés de diversification du vivant. Montrez, en présentant l'exemple de votre choix, que la diversification des êtres vivants est aussi possible sans modification des génomes.

CHAPITRE 3

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

Au sein d'une espèce, les populations comprennent des individus divers, qui diffèrent par leurs allèles et leurs caractères. L'évolution de la diversité des populations au cours du temps peut conduire à l'émergence ou à la disparition d'espèces.

Tortue géante des îles Galápagos (océan Pacifique).

Quelles sont les modalités d'apparition et de disparition d'une espèce ? Comment peut-on définir une espèce ?

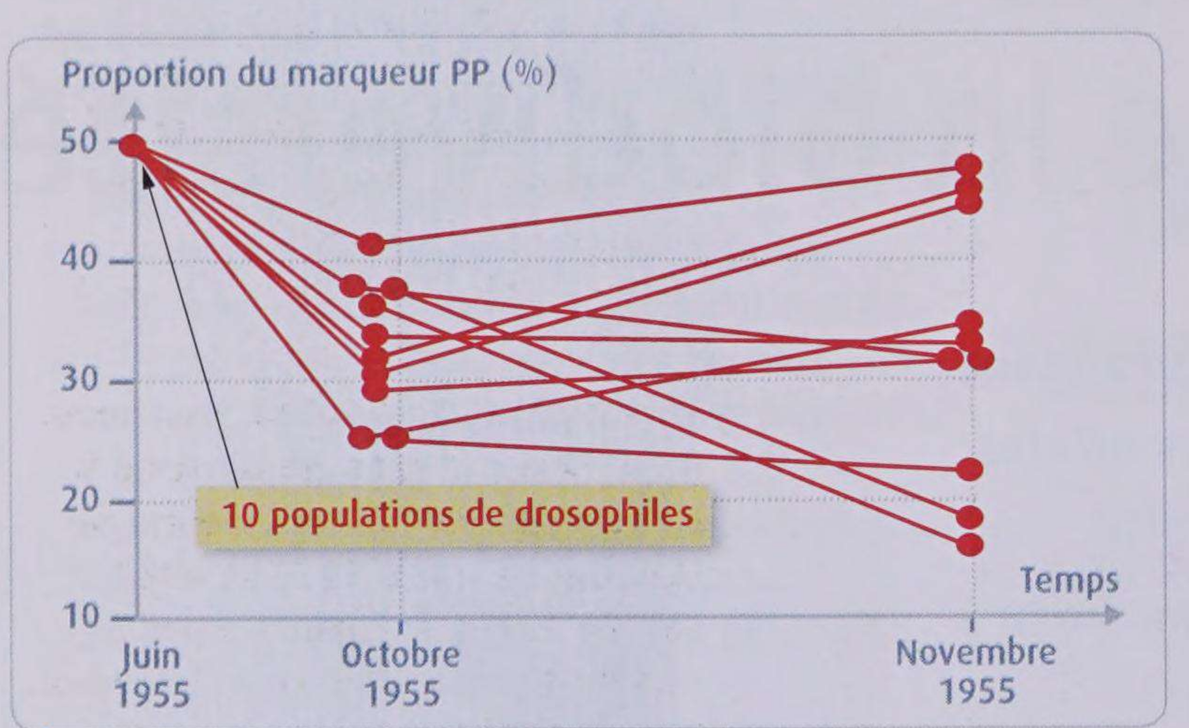
UNITÉ 1

Les modifications des populations au cours du temps

La biodiversité la plus évidente à constater s'observe à l'échelle des espèces. Pourtant, au sein d'une population d'individus d'une même espèce, il existe une forte diversité d'allèles et de caractères.

Comment la diversité des populations évolue-t-elle au cours du temps ?

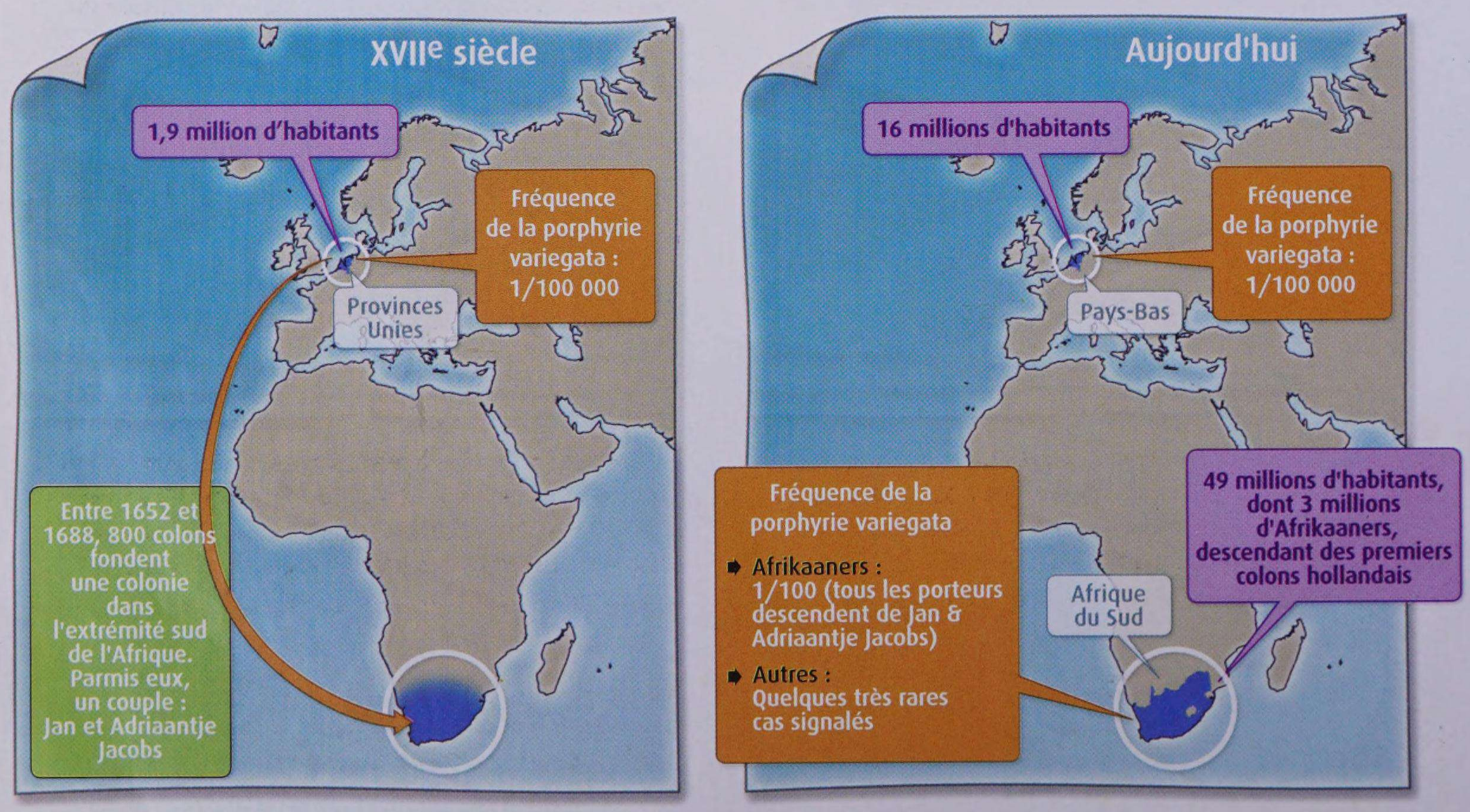
Des modifications sous l'effet du hasard



1 Évolution au cours du temps de la proportion d'un marqueur génétique dans 10 populations de drosophiles en captivité. Au départ, 50 % des individus possèdent à l'état homozygote le marqueur génétique PP (une modification de la structure d'une petite région d'un chromosome), qui n'apporte aucun inconvénient ni avantage à l'individu qui le porte.

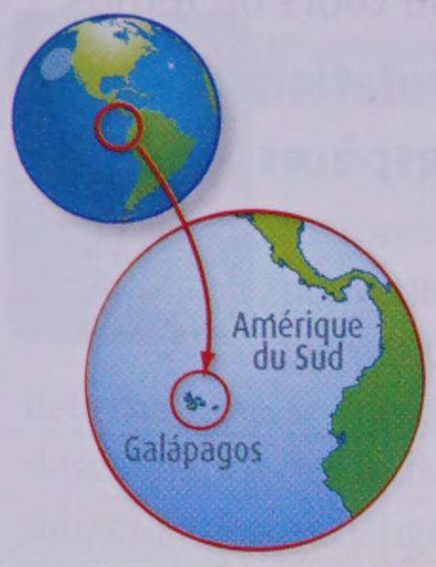
Les allèles et donc les caractéristiques génétiques qu'une génération transmet à la suivante dépendent, de façon aléatoire, de la formation des gamètes et de leur rencontre lors de la fécondation. La fréquence des allèles peut donc varier au cours des générations de façon aléatoire, cela d'autant plus rapidement que la population est petite : c'est la dérive génétique. De la même façon, lors d'une migration, les migrants ne vont emporter qu'une partie des allèles de la population d'origine et dans des proportions aléatoires. La nouvelle population formée par les migrants aura donc des fréquences alléliques différentes de la population d'origine : on parle d'effet de fondation pour qualifier cette forme particulière de dérive génétique.

2 Le hasard et la transformation des populations.



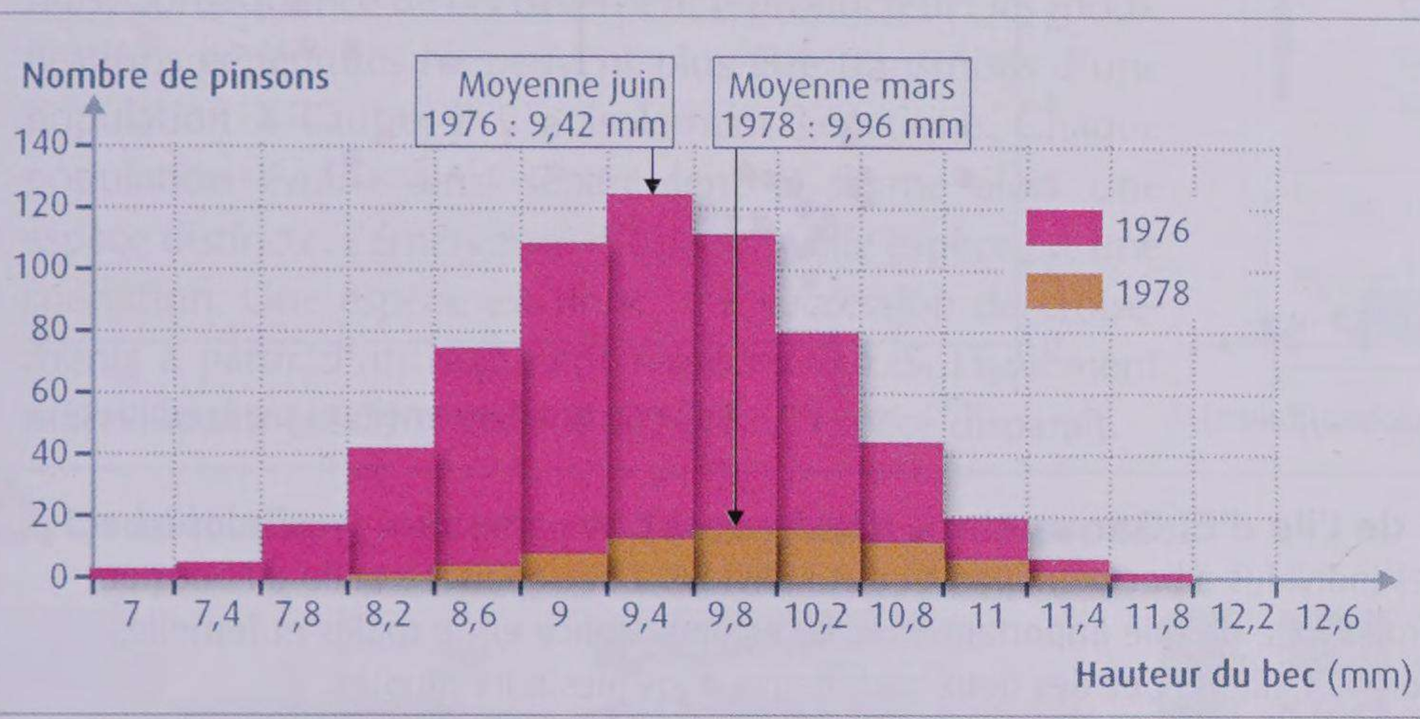
3 Évolution de la fréquence d'une maladie génétique (porphyrie variegata) dans deux populations humaines entre le XVIIe siècle et nos jours. Cette maladie implique un seul locus. Les personnes atteintes ont peu de symptômes (faiblesse musculaire, insomnie, urines colorées en rouge sombre). Leur survie et leur fertilité sont normales.

Des modifications sous l'effet de l'environnement

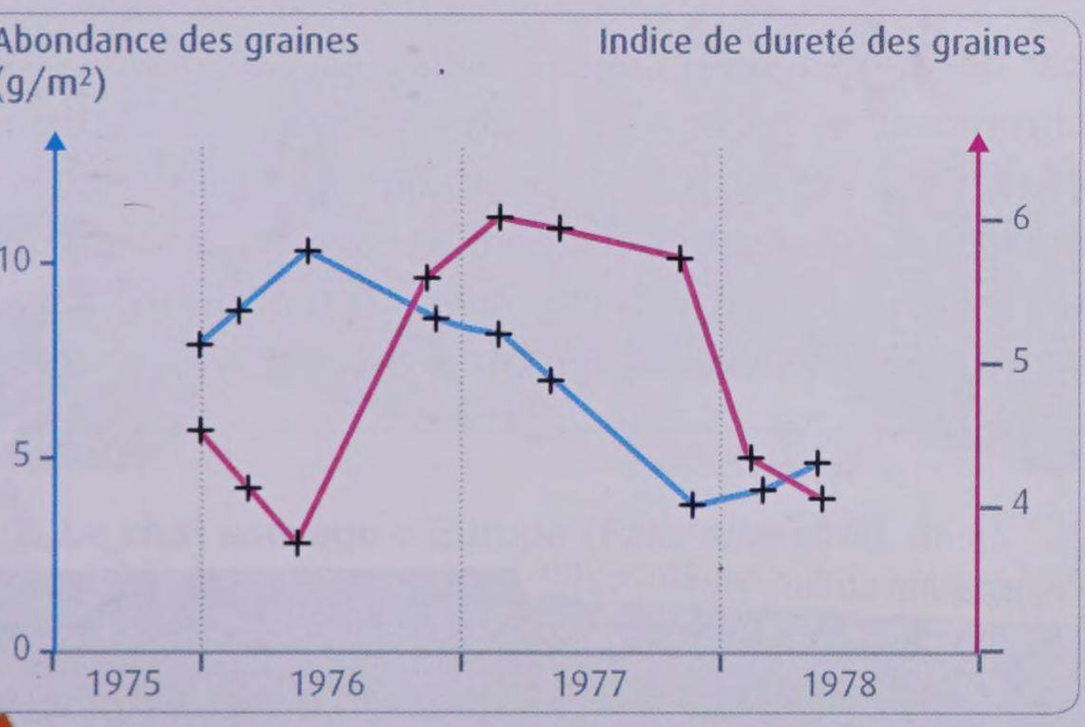


	Pinson à bec moyen	Pinson à gros bec
Temps pour briser un fruit	7 sec	2 sec
Nombre de graines récoltées	1-2 par fruit	4-6 par fruit
Temps de récolte	15 sec	7 sec

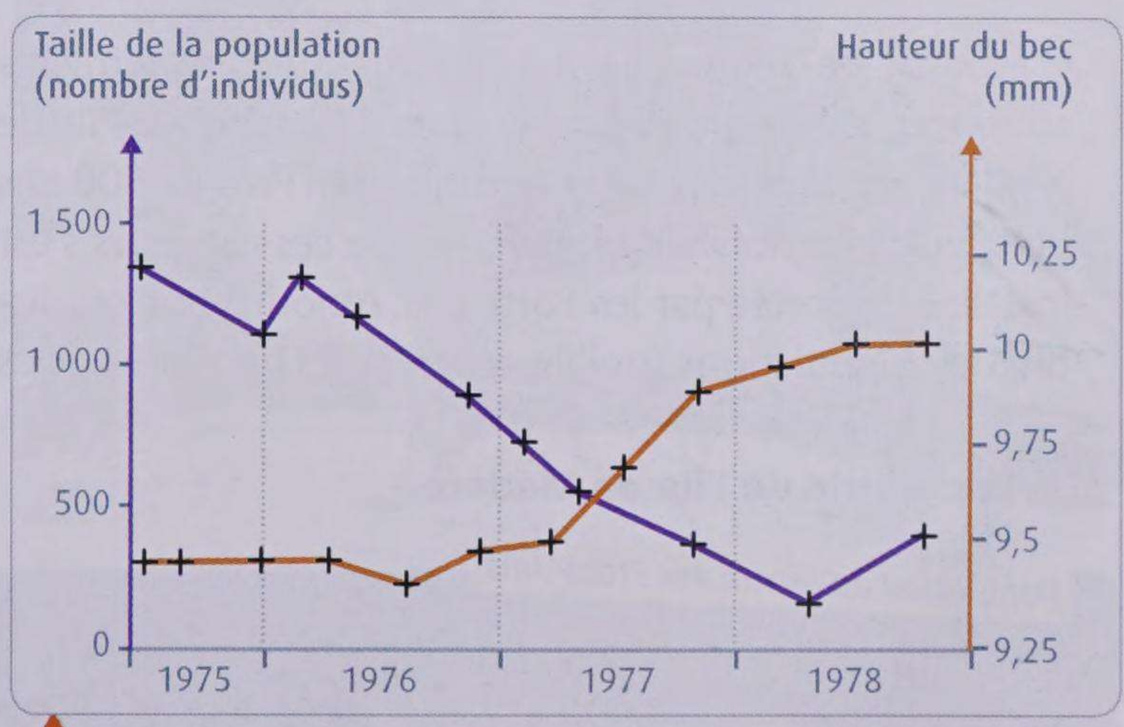
4 Comparaison des conditions d'accès aux graines d'un fruit sec chez le pinson à gros bec (*Geospiza magnirostris*) et chez le pinson à bec moyen (*Geospiza fortis*). Ces deux espèces vivent sur l'archipel des Galápagos (océan Pacifique). Les petits naissent entre janvier et avril et, au minimum un an plus tard, les femelles élèvent leur première couvée. Ces pinsons vivent au maximum 15 ans et se nourrissent de graines qu'ils écrasent avec leur bec après les avoir extraites de fruits secs.



5 Variabilité de la hauteur des becs dans la population de pinsons à bec moyen de l'île de Daphne au Galápagos entre 1976 et 1978. L'année 1977 a été marquée par une sécheresse exceptionnelle et les pinsons ne se sont pas reproduits, faute de nourriture. Les 85 individus vivants en mars 1978 sur l'île étaient déjà présents en 1976. Aucune migration de pinson n'a été constatée entre ces deux dates. La reproduction a repris normalement en 1978.



6 Évolution des caractéristiques des graines disponibles sur l'île Daphne (Galápagos) entre 1975 et 1979. Ce document ne tient pas compte de la consommation par les animaux.



7 Évolution des caractéristiques de la population de pinsons à bec moyen sur l'île Daphne (Galápagos) entre 1975 et 1979. La hauteur du bec est un caractère héritable (transmis par les parents à leur descendance).

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À l'aide des documents de la double page, montrez l'importance du hasard, des conditions environnementales et de la concurrence entre êtres vivants dans l'évolution des populations.

Pour cela, vous pouvez :
- déterminer le phénomène à l'origine des variations génétiques observées **(DOC. 1 À 3)**.
- montrer que les variations de la taille du bec des pinsons à bec moyen s'explique, dans le cadre de la sélection naturelle, à la fois par une survie différentielle et une reproduction différentielle **(DOC. 4 À 7)**.

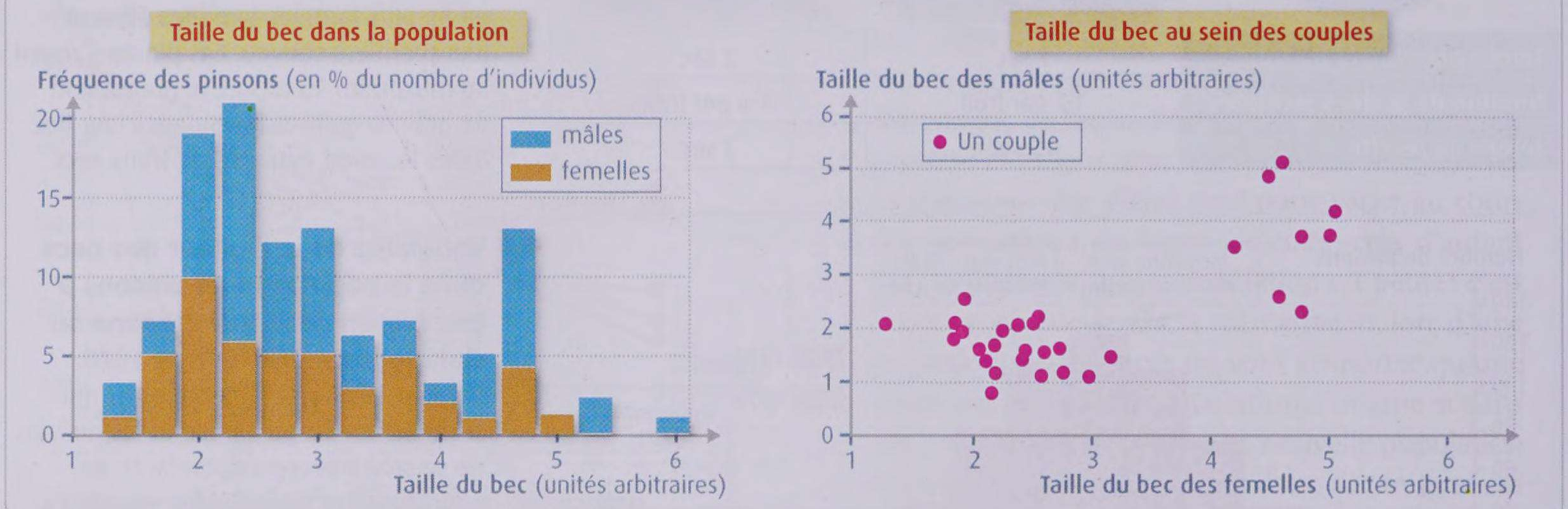
UNITÉ 2

De l'évolution des populations à l'évolution des espèces

Sous l'effet de la pression du milieu, de la concurrence entre êtres vivants et du hasard, la diversité des populations change au cours des générations : les populations évoluent au cours du temps.

Comment relier l'évolution des populations à l'apparition et à la disparition des espèces qui marque l'histoire du vivant ?

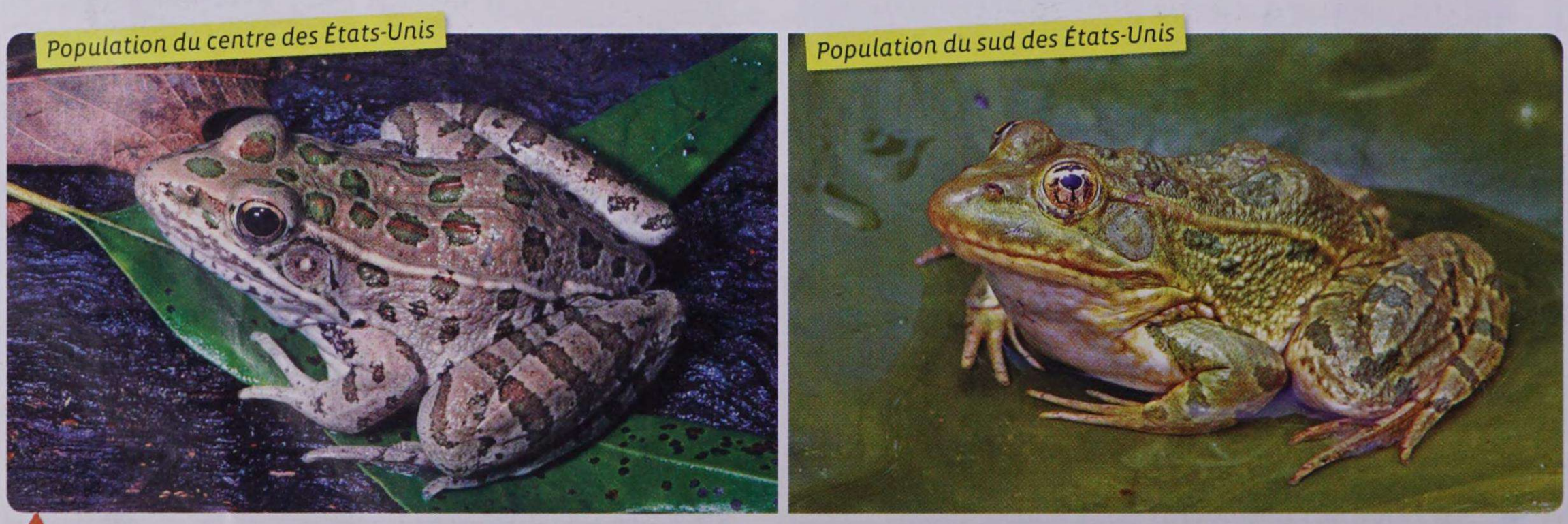
Évolution des populations et reproduction



1 Une étude des pinsons à bec moyen de l'île d'El Garrapatero (Galápagos). La population de pinsons à bec moyen (*Geospiza fortis*) de cette île comprend des individus à bec peu épais et des individus à bec épais. La taille du bec peut modifier le chant des oiseaux. Sachant que ce dernier joue un rôle important dans la reconnaissance entre mâles et femelles lors de la parade nuptiale, les chercheurs ont étudié la taille du bec des deux partenaires dans plusieurs couples.

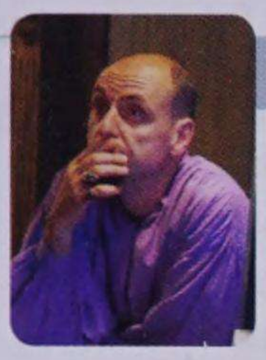
C'est avec les Vikings, il y a 1000 ans, que les premières souris ont débarqué en provenance d'Europe sur l'île de Madère (au large des côtes portugaises). Près de 500 ans plus tard, une nouvelle population de ces rongeurs s'est installée, apportée par les Portugais. Aujourd'hui, on distingue 6 populations sur l'île, séparées les unes des autres par des montagnes infranchissables. Au lieu d'avoir 40 chromosomes comme les souris européennes, elles en ont entre 22 et 30, suite à des fusions chromosomiques. Lorsque l'on met artificiellement en contact des souris de deux populations, l'accouplement a lieu et donne naissance à des hybrides. Toutefois, ces hybrides sont stériles.

2 Les souris de l'île de Madère.



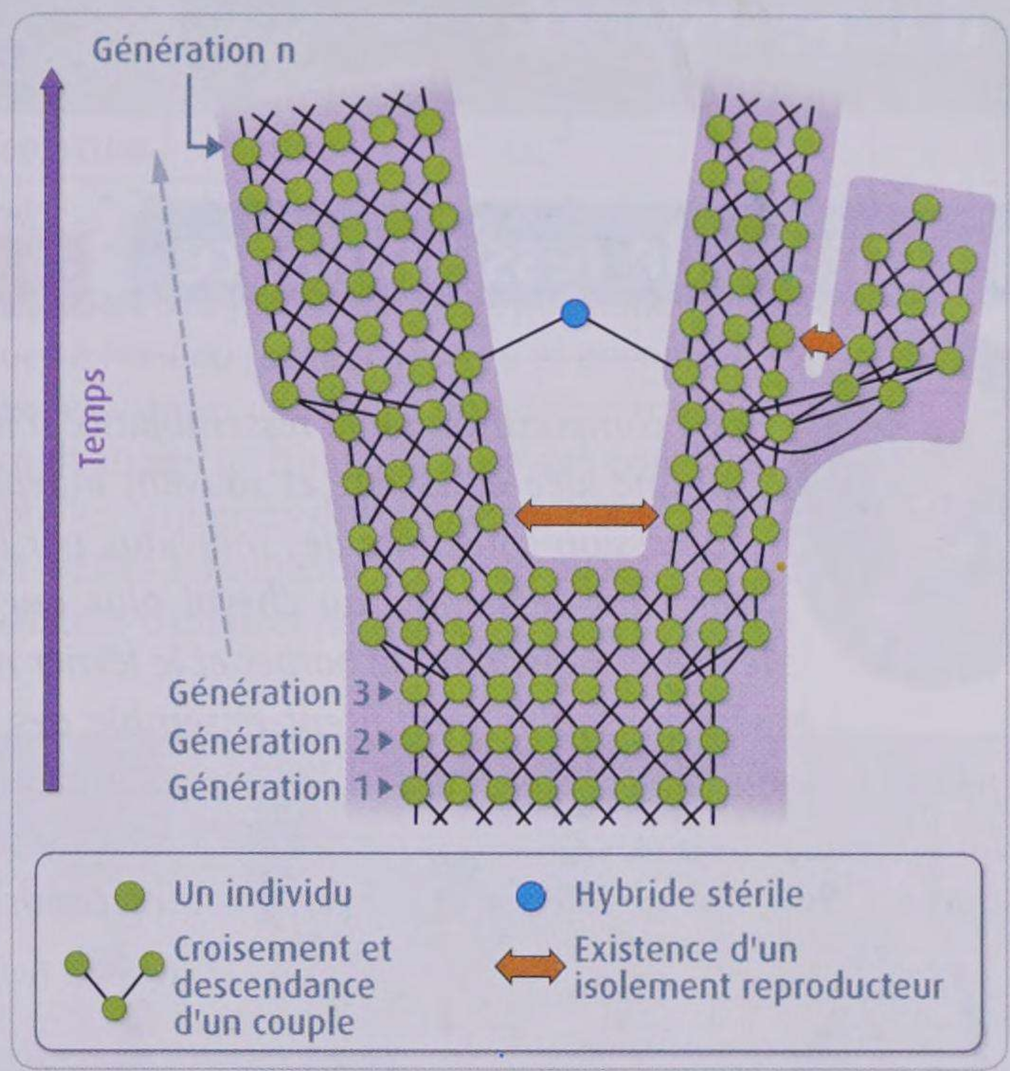
3 Les populations de grenouilles léopard. Des chercheurs ont tenté de faire se reproduire deux populations de grenouilles léopard (genre *Rana*) vivant soit au centre, soit au sud des Etats-Unis. Malgré quelques rares accouplements, aucun hybride n'a pu être obtenu. Des recherches complémentaires ont montré que les périodes de reproduction n'étaient pas les mêmes et que les chants utilisés pour la rencontre des partenaires sexuels étaient nettement différents.

Spéciations et extinctions



Interview de **Guillaume Lecointre**, chercheur en systématique et en évolution.

Lorsque les individus de deux populations initialement de la même espèce ne peuvent plus se reproduire entre eux (l'accouplement est impossible, ou bien il peut avoir lieu mais, ne se traduit par aucune naissance, ou encore la descendance des individus est stérile), il y a isolement reproducteur : les échanges génétiques liés à la reproduction sexuée cessent. L'isolement reproducteur résulte de l'accumulation progressive de différences génétiques entre deux populations qui, du fait d'une barrière comportementale ou géographique, ont des échanges génétiques réduits ou nuls. Conséquence de cet isolement reproducteur : les modifications génétiques ne peuvent plus être transmises d'une population à l'autre, il y a isolement génétique. Chaque population évolue ainsi séparément et forme alors une espèce distincte. L'émergence d'une nouvelle espèce est une spéciation. Une espèce est donc une succession de croisements à partir d'un isolement reproducteur. Si l'isolement reproducteur (et donc génétique) cesse, l'espèce disparaît.



Le flux des générations au cours de l'évolution.

4 La spéciation : mécanisme d'émergence d'une espèce.

5 Le chat sauvage d'Europe (*Felis silvestris*). On a coutume de distinguer les espèces *Felis catus* et *Felis silvestris*. *F. silvestris* peuplait les forêts d'Europe bien avant que *F. catus* (le chat domestique) ne soit introduit d'Égypte sous l'Antiquité. L'accouplement entre ces chats est rare. Toutefois, quand il a lieu, les hybrides sont fertiles. *F. silvestris* est considéré comme une espèce menacée (en voie d'extinction).

6 Le dernier thylacine (*Thylacinus cynocephalus*). Il est mort en septembre 1936 au zoo de Hobart en Australie. Cette espèce de marsupial carnassier existait depuis environ 4 millions d'années. La chasse intensive est la principale cause de l'extinction des thylacines.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 4.** Dans chaque exemple (doc. 1 à 3), déterminez si les populations étudiées forment deux espèces distinctes.

2 **DOC. 4.** Situez sur le schéma les espèces, les événements de spéciation et les extinctions d'espèces.

3 **DOC. 5.** Expliquez pourquoi le chat sauvage est considéré comme une espèce menacée, puis discutez le fait que l'on puisse réellement considérer le chat domestique et le chat sauvage comme deux espèces différentes.

4 **DOC. 5 ET 6.** Montrez qu'une espèce peut disparaître de différentes manières.

5 **EN CONCLUSION.** Expliquez comment l'évolution des populations peut modifier la biodiversité à l'échelle des espèces.

UNITÉ 3

La définition d'une espèce

Une espèce est une population d'individus isolée génétiquement des autres populations. Dans la nature actuelle ou dans les archives fossiles, la diversité des formes vivantes est foisonnante.

Quels critères permettent de définir les différentes espèces qui font la diversité du vivant ?

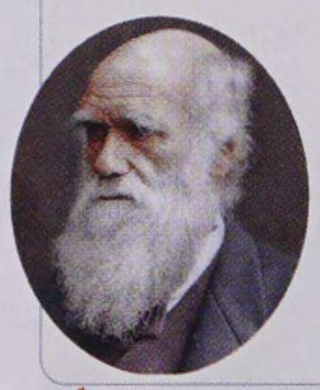
Le critère de ressemblance

HISTOIRE DES SCIENCES

« La comparaison de la ressemblance d'individus n'est qu'une idée accessoire et souvent indépendante de la succession constante des individus par la génération ; car l'âne ressemble au cheval plus que le barbet au lévrier et cependant le barbet et le lévrier ne font qu'une espèce puisqu'ils produisent ensemble des individus qui peuvent eux-mêmes en produire d'autres, au lieu que le cheval et l'âne sont certainement des espèces différentes puisqu'ils ne produisent entre eux que des individus viciés et inféconds. »

Georges Buffon (1707-1788)

Georges Cuvier (1769-1832) définit l'espèce comme *« une collection de tous les corps organisés, nés les uns des autres ou de parents communs, et de ceux qui leur ressemblent autant qu'il se ressemblent entre eux. »*



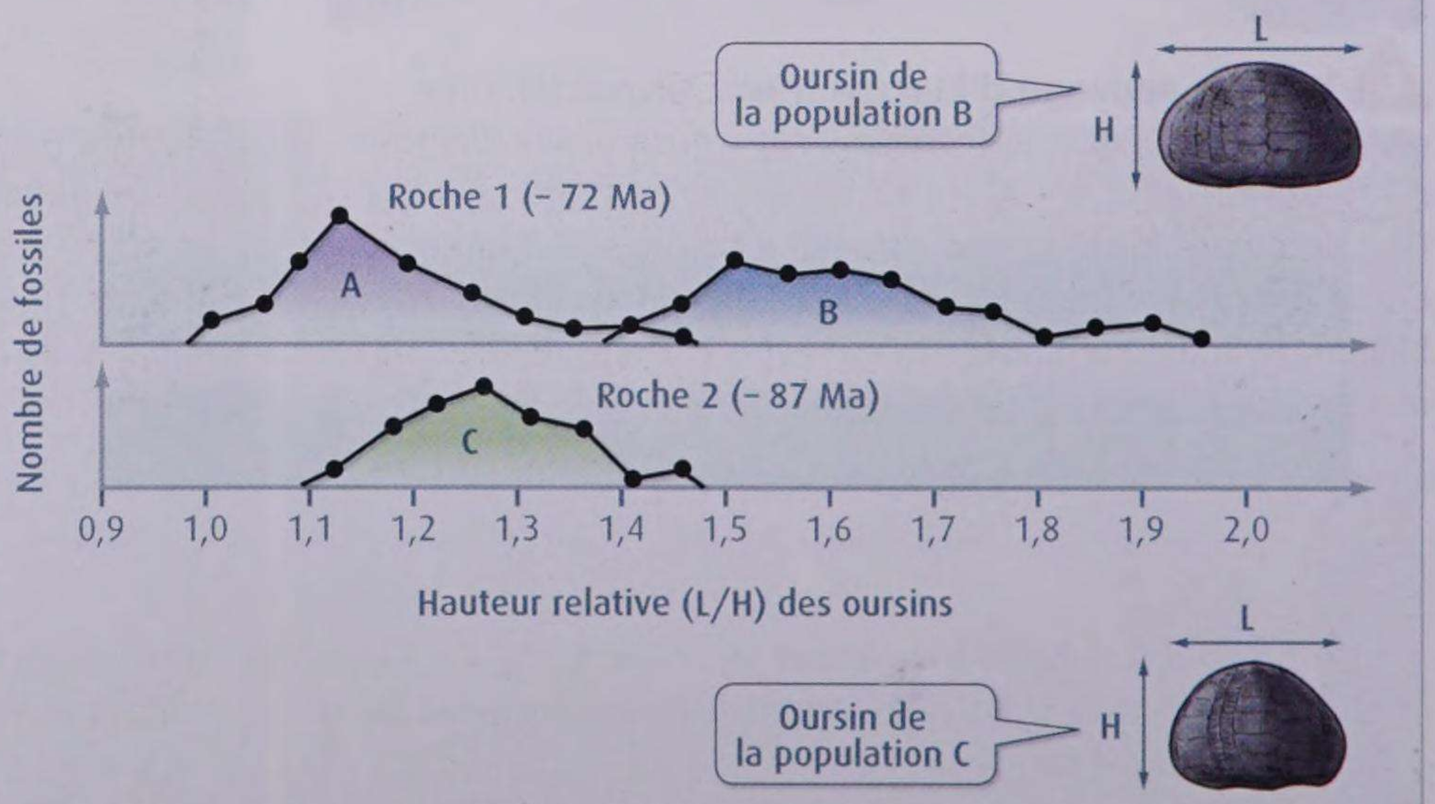
« Je considère le terme d'espèce comme arbitrairement donné par pure commodité à un ensemble d'individus se ressemblant beaucoup entre eux [...]. »

Charles Darwin (1809-1882)

1 Le point de vue de trois naturalistes sur la définition d'une espèce.

Si nous voyons un chat, nous savons qu'il appartient à l'espèce « chat » car il ressemble à d'autres chats que nous avons déjà rencontrés. C'est une première façon de reconnaître si deux individus sont de la même espèce : ils le sont s'ils se ressemblent. Ce critère de ressemblance est utilisé dans la définition typologique de l'espèce : un individu appartient à une espèce s'il ressemble au « type » de l'espèce (individu de référence placé dans la collection d'un musée).

2 La définition typologique de l'espèce.



3 Quantification de la ressemblance entre des fossiles d'oursin (genre *Galerites*). On mesure le rapport diamètre (L) sur hauteur (H) sur des fossiles d'oursin pour différencier trois populations (A, B et C) trouvées, en un même site de fouille, dans deux couches de roches d'âge différent.

Le critère d'interfécondité

En 1942, le biologiste Ernst Mayr (1904-2005) écrivait : « *Les espèces sont des groupes de populations réellement ou potentiellement capables de se croiser et qui sont reproductivement isolés des autres groupes ayant les mêmes propriétés.* » Mayr expose ainsi la définition biologique de l'espèce, qui repose sur le critère d'interfécondité : deux individus sont de la même espèce s'ils peuvent se reproduire entre eux et avoir une descendance fertile.

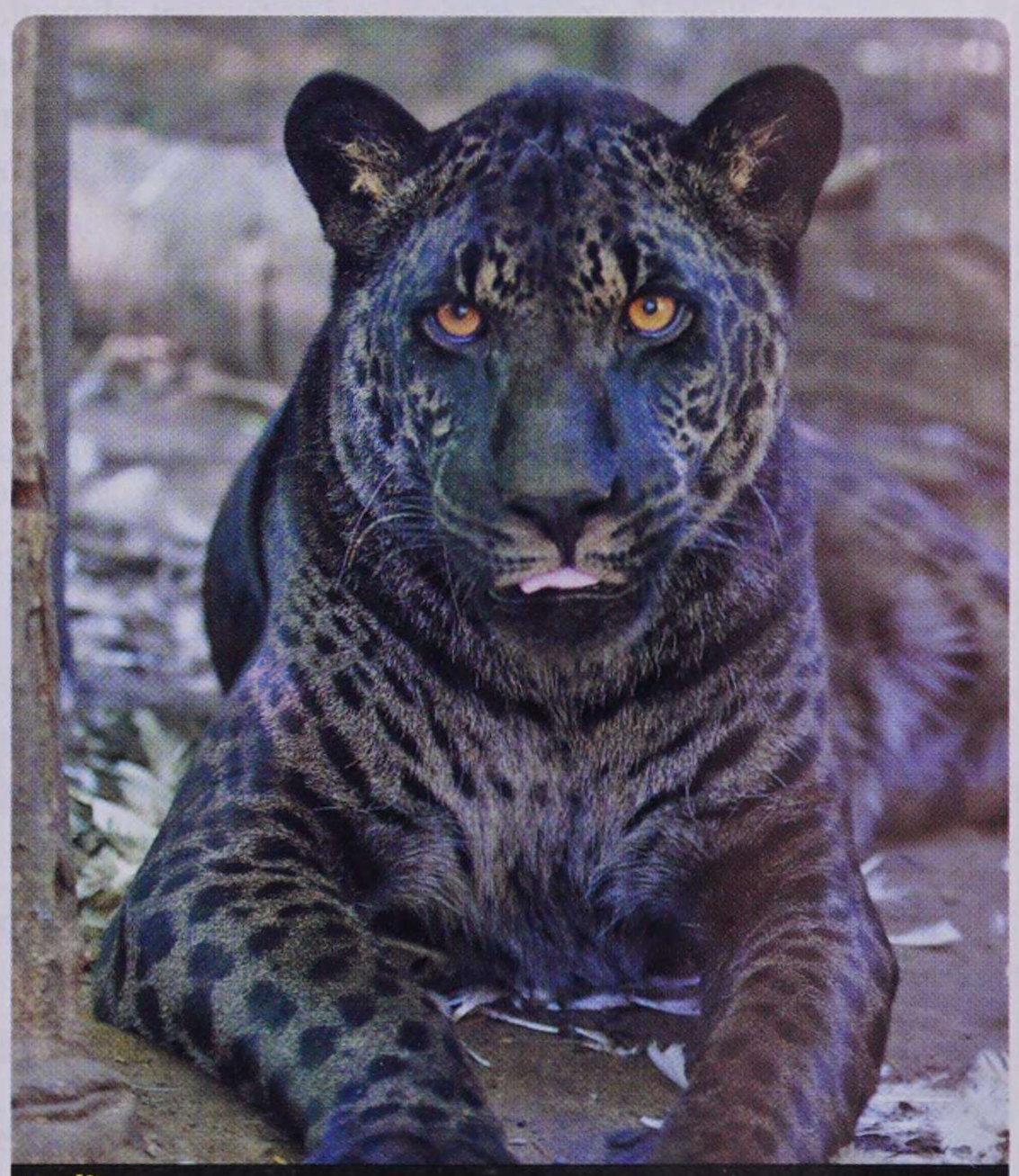
4 La définition biologique de l'espèce, une définition cohérente avec la théorie de l'évolution

Femelles / Mâles	*pseudoobscura*		*persimilis*	
	inséminées (%)	vierges (%)	inséminées (%)	vierges (%)
pseudoobscura	84,3	15,7	7,0	93,0
persimilis	22,5	77,5	79,2	20,8

5 Les espèces jumelles. Deux populations de drosophiles identiques à l'œil nu (*pseudoobscura* et *persimilis*) sont étudiées : des femelles vierges de chaque population sont placées en présence de mâles de l'une ou l'autre des populations, puis on dénombre les tentatives d'accouplement. Aucun descendant viable ne résultera des accouplements intergroupes. Les deux populations sont qualifiées d'espèces jumelles.

Chien-loup (crocotte)

- **Parent mâle :** chien domestique (*Canis familiaris*)
- **Parent femelle :** loup gris (*Canis lupus*)
- **Hybridation observée dans la nature**
- **Hybride fertile**



Jaglion

- **Parent mâle :** jaguar (*Panthera onca*)
- **Parent femelle :** lionne (*Panthera leo*)
- **Hybridation très rare et en captivité seulement**
- **Hybride stérile**

6 Deux exemples d'hybrides chez des mammifères.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À l'aide des documents de la double page, déterminez quelques avantages et quelques problèmes posés par la définition typologique et par la définition biologique de l'espèce.

Pour cela, vous pouvez :
- discuter les arguments présentés par Buffon **DOC. 1.**
- discuter le fait que les individus parents du **DOC. 6** et les deux populations du **DOC. 5** appartiennent on non des espèces distinctes.
- indiquer les problèmes qui se posent au paléontologue qui souhaite savoir si les fossiles A et C sont de la même espèce **DOC. 3**.

CHAPITRE 3

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

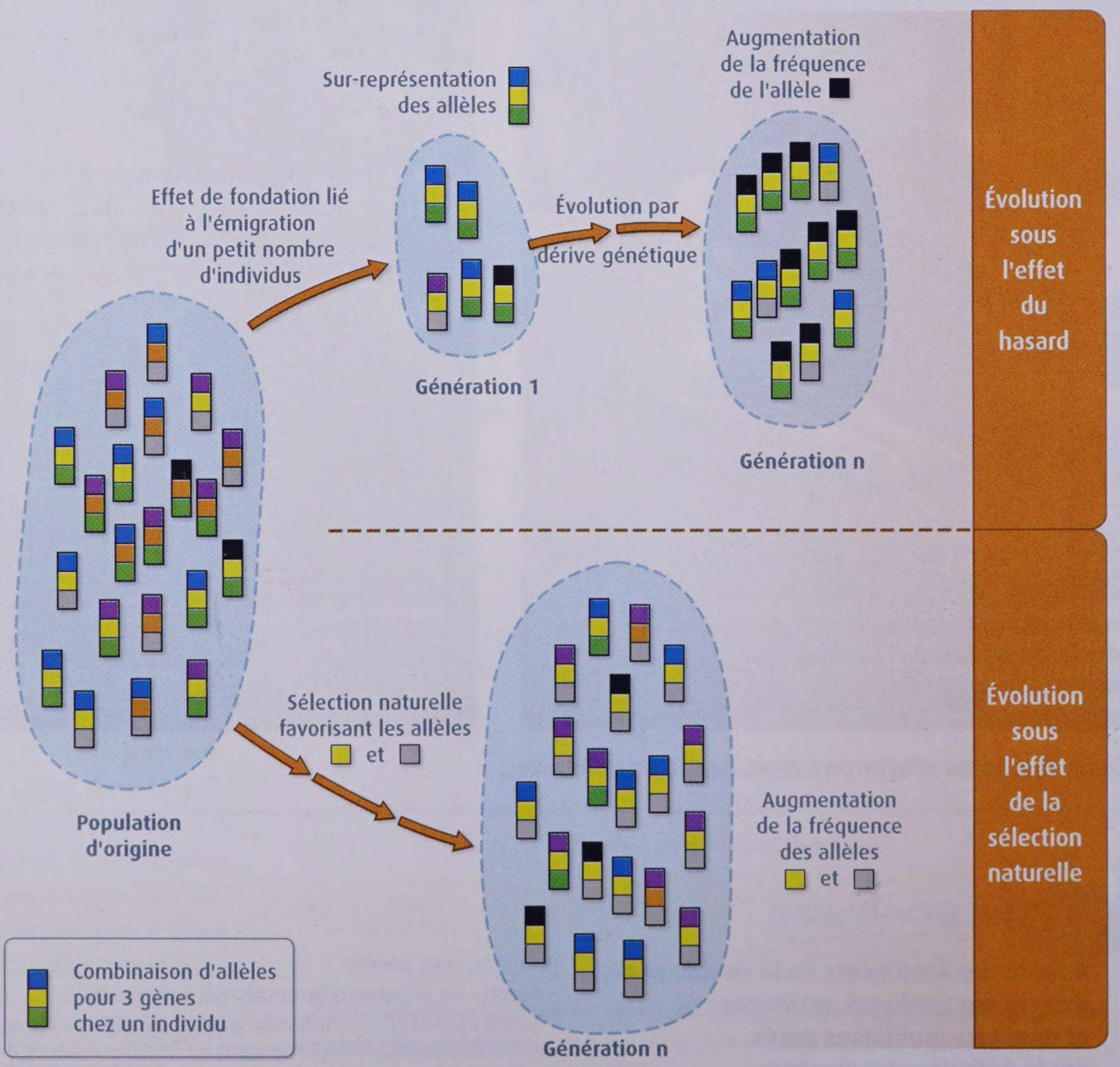
UNITÉ 1 Les modifications des populations au cours du temps

• Une population est constituée d'individus de la même espèce qui ne possèdent pas les mêmes combinaisons d'allèles des différents gènes constituant leur génome. On observe donc une diversité génétique à l'intérieur des populations. Différents facteurs modifient cette diversité au cours des générations.

• La fréquence d'allèles dont la présence est sans conséquence sur la fertilité et la survie des individus varie d'une génération à l'autre sous le seul effet du hasard. C'est la dérive génétique. Lors d'une migration, le hasard joue aussi un rôle dans la modification des populations : les émigrants emportant un échantillon aléatoire des allèles de la population initiale, la fréquence des allèles dans la nouvelle population ne sera pas la même que dans la population de départ. Cette forme particulière de dérive génétique est qualifiée d'effet de fondation.

• À un instant donné, les individus d'une population ont une survie et une fertilité différentes selon les conditions du milieu (accès aux ressources alimentaires, compétition avec d'autres espèces, etc.). Ceux dont le phénotype est favorisé auront un plus grand nombre de descendants et la fréquence des allèles qu'ils portent augmentera à la génération suivante. C'est le mécanisme de sélection naturelle.

• Hasard et sélection naturelle agissent simultanément sur la transformation des populations. Ce sont deux mécanismes à l'origine de modifications de la diversité génétique et phénotypique des populations au cours des générations. On appelle évolution biologique ces modifications des populations.

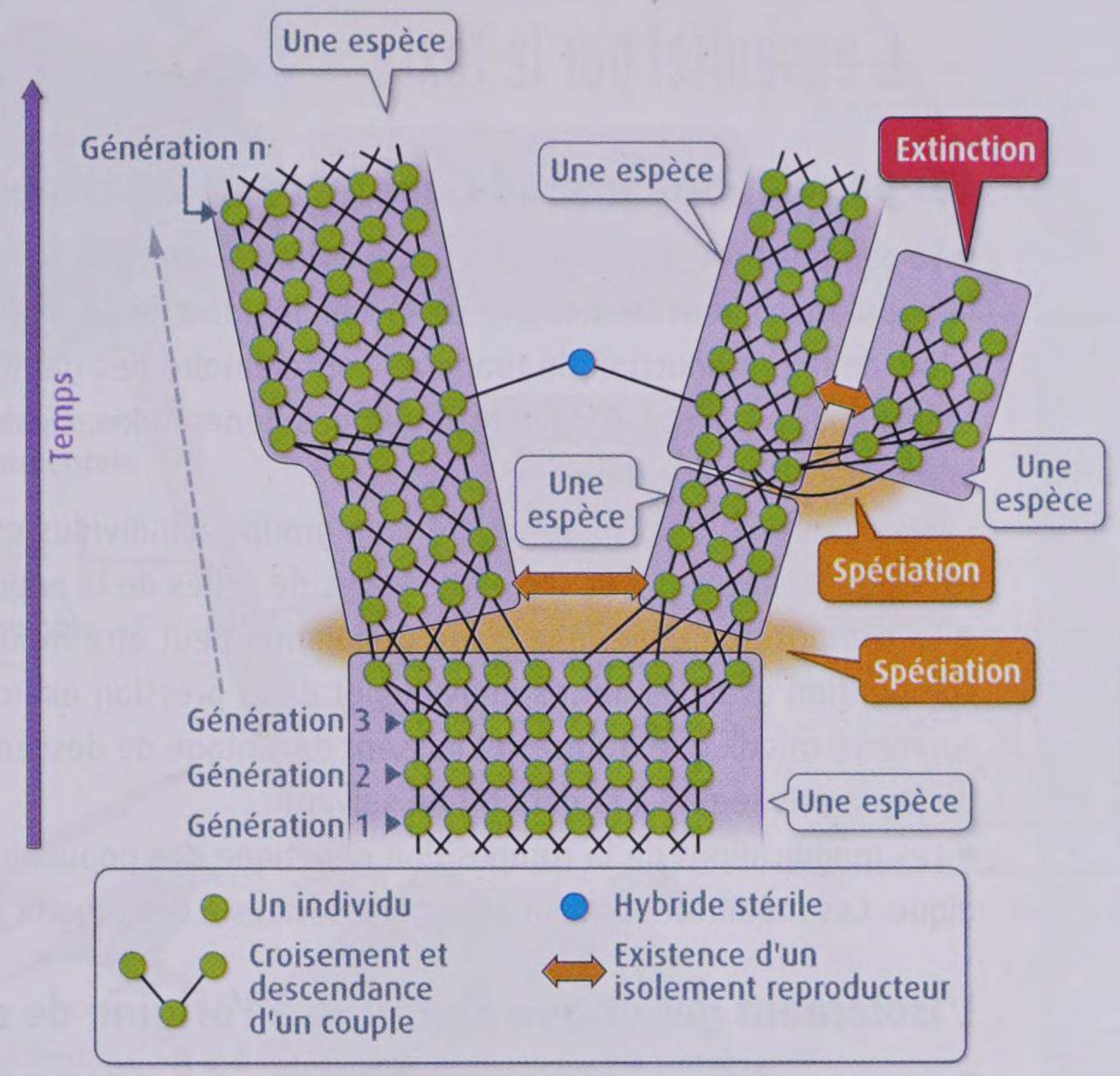


Les modifications de la diversité génétique des populations au cours du temps.

UNITÉ 2 De l'évolution des populations à l'évolution des espèces

• Au sein d'une même espèce, deux populations isolées par une barrière géographique ou comportementale ont des échanges génétiques liés à la reproduction sexuée réduits et accumulent des différences génétiques. Au-delà d'un certain seuil, ces différences peuvent empêcher les individus des deux populations de se reproduire entre eux : il y a alors isolement reproducteur. Les causes de ce dernier sont, par exemple, l'absence de reconnaissance des chants nuptiaux, le décalage des périodes de reproduction ou la stérilité des individus hybrides.

• L'isolement reproducteur entre deux populations est associé à un isolement génétique : il n'y a plus d'échanges d'allèles entre elles. Chaque population est alors considérée comme une nouvelle espèce, qui continuera à évoluer séparément, sous l'effet du hasard et de la sélection naturelle.



Spéciations et extinctions au cours de l'évolution.

• Le processus à l'origine de la formation d'une nouvelle espèce se nomme spéciation. Une espèce disparaît si tous les individus qui la composent meurent sans avoir eu de descendants ou si son isolement génétique cesse par rupture de l'isolement reproducteur (apparition d'hybrides fertiles issus de croisements avec une autre espèce). Une espèce est donc définie dans le temps.

UNITÉ 3 La définition d'une espèce

• La diversité des espèces est une des composantes de la biodiversité. On peut rattacher des individus à une espèce donnée selon différents critères.

• Selon le critère de ressemblance, deux individus sont de la même espèce s'ils se ressemblent. À ce critère, correspond une définition typologique de l'espèce : un individu appartient à une espèce s'il ressemble au « type » de cette espèce (individu de référence décrit scientifiquement et conservé dans un musée).

• Selon le critère d'interfécondité, deux individus sont de la même espèce s'ils peuvent se reproduire entre eux et avoir une descendance fertile. À ce critère, correspond la définition biologique de l'espèce, plus rigoureuse au plan évolutif : une espèce est définie par un isolement reproducteur.

• La définition de l'espèce a varié au cours de l'histoire de la biologie. Aujourd'hui, selon le contexte scientifique, on utilise soit la définition typologique, soit la définition biologique.

	Définition typologique	Définition biologique
Critère	Ressemblance	Interfécondité
Avantage	Facile à utiliser dans la plupart des cas	Cohérente avec la théorie de l'évolution
Inconvénient	Parfois difficilement compatible avec la diversité des individus d'une espèce	Non testable sur les fossiles et sur la plupart des espèces actuelles (élevage impossible par exemple)

Définition typologique et définition biologique de l'espèce.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 3

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

L'essentiel par le texte

Les populations se modifient au cours du temps

• La composition génétique des **populations** (nature et fréquence des différents allèles parmi les individus de la population) peut se modifier de façon aléatoire de génération en génération. Ainsi :

– lors de la reproduction, le tirage au sort aléatoire des gamètes à l'origine du zygote induit une variation aléatoire de la fréquence des allèles au fil des générations. C'est la **dérive génétique**, d'autant plus marquée que la population est petite.

– lors d'une migration, l'isolement d'un groupe d'individus est à l'origine d'une petite population dans laquelle les fréquences alléliques sont différentes de celles de la population initiale. C'est l'effet fondateur.

• La composition génétique d'une population peut être modifiée par la **sélection naturelle** : sous l'effet de la compétition avec les autres individus et de la pression exercée par les conditions du milieu, certains individus survivent mieux que d'autres et laissent davantage de descendants. Les allèles qu'ils portent sont donc transmis de façon privilégiée à la génération suivante.

• Les modifications de la composition génétique des populations au cours du temps constituent l'évolution biologique. Ces modifications sont souvent associées à des modifications de caractères phénotypiques.

L'isolement génétique peut être à l'origine de nouvelles espèces

• Deux populations isolées par une barrière comportementale ou géographique évoluent séparément : elles accumulent des différences génétiques. Au bout d'un certain temps, il arrive que les différences soient telles que les individus d'une population ne peuvent plus de reproduire avec ceux de l'autre : il y a isolement reproducteur et donc isolement génétique (absence d'échanges d'allèles entre les populations). Chaque population forme désormais une nouvelle espèce : il y a eu spéciation.

• Une espèce peut disparaître si cet isolement génétique est rompu ou si tous les individus qui la composent disparaissent. L'existence d'une espèce est donc limitée dans le temps.

• Au cours de l'histoire des sciences, la définition de l'espèce a évolué. La **définition typologique** est fondée sur le critère de ressemblance. La **définition biologique** tient compte de l'importance de l'isolement reproducteur : elle est fondée sur le critère interfécondité.

Les capacités et attitudes

- Saisir des données et les intégrer dans un modèle explicatif **(unités 1 et 2)**
- Identifier les phénomènes à l'origine de l'évolution biologique à partir de données expérimentales **(unité 1)**
- Comprendre l'importance de l'isolement génétique dans l'évolution des populations et analyser des exemples de spéciation **(unité 2)**
- Discuter les définitions de l'espèce et les appliquer à des situations réelles **(unité 3)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Définition biologique de l'espèce : deux individus appartiennent à la même espèce s'ils peuvent avoir ensemble une descendance fertile (critère d'interfécondité).

Définition typologique de l'espèce : un individu appartient à une espèce s'il ressemble à l'individu type de cette espèce conservé dans la collection d'un musée (critère de ressemblance).

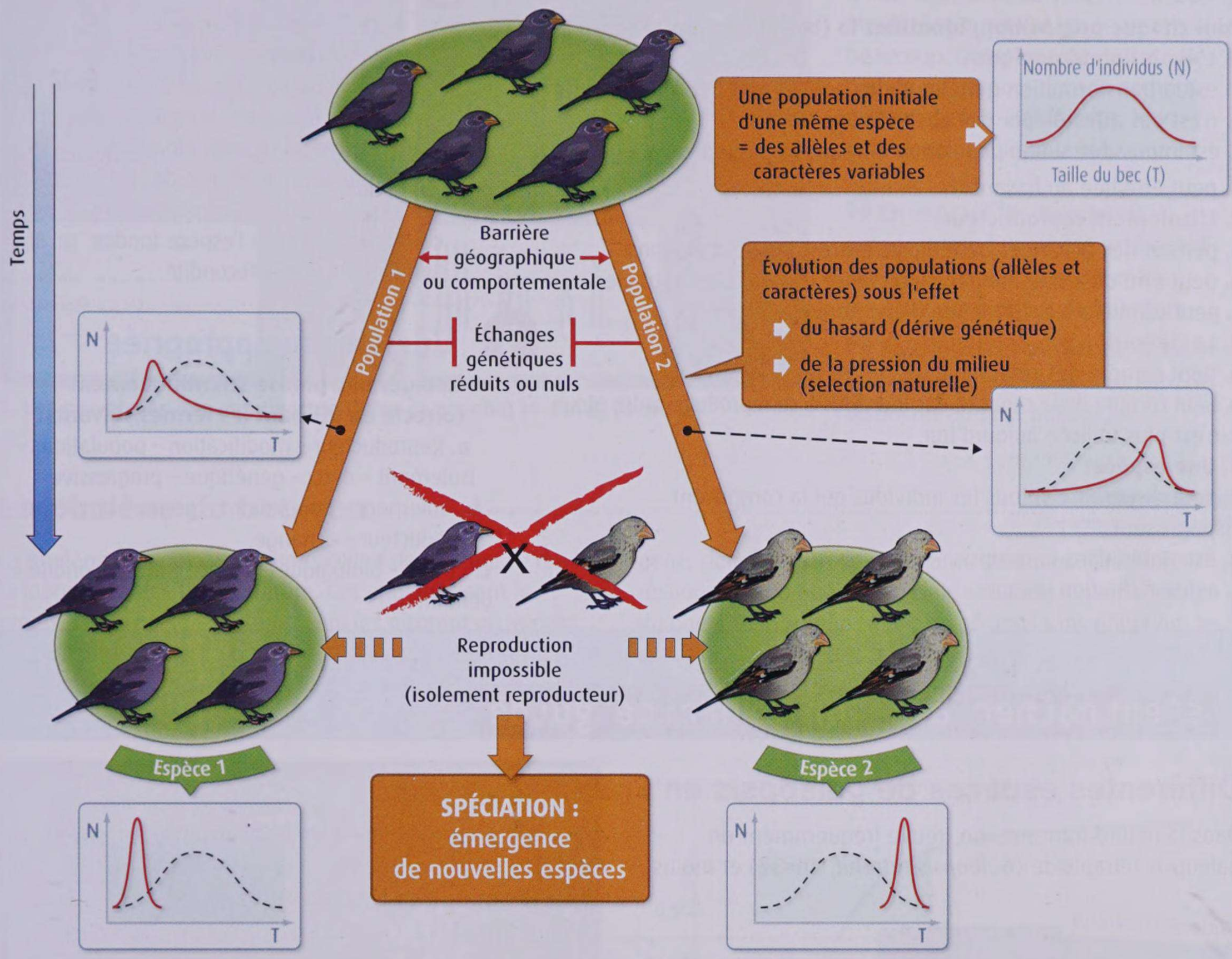
Dérive génétique : évolution de la composition génétique d'une population sous l'effet du hasard. La fréquence des allèles non soumis à la sélection naturelle évolue sous le seul effet de la dérive génétique.

Population : ensemble d'individus appartenant à la même espèce et se trouvant dans un même espace géographique.

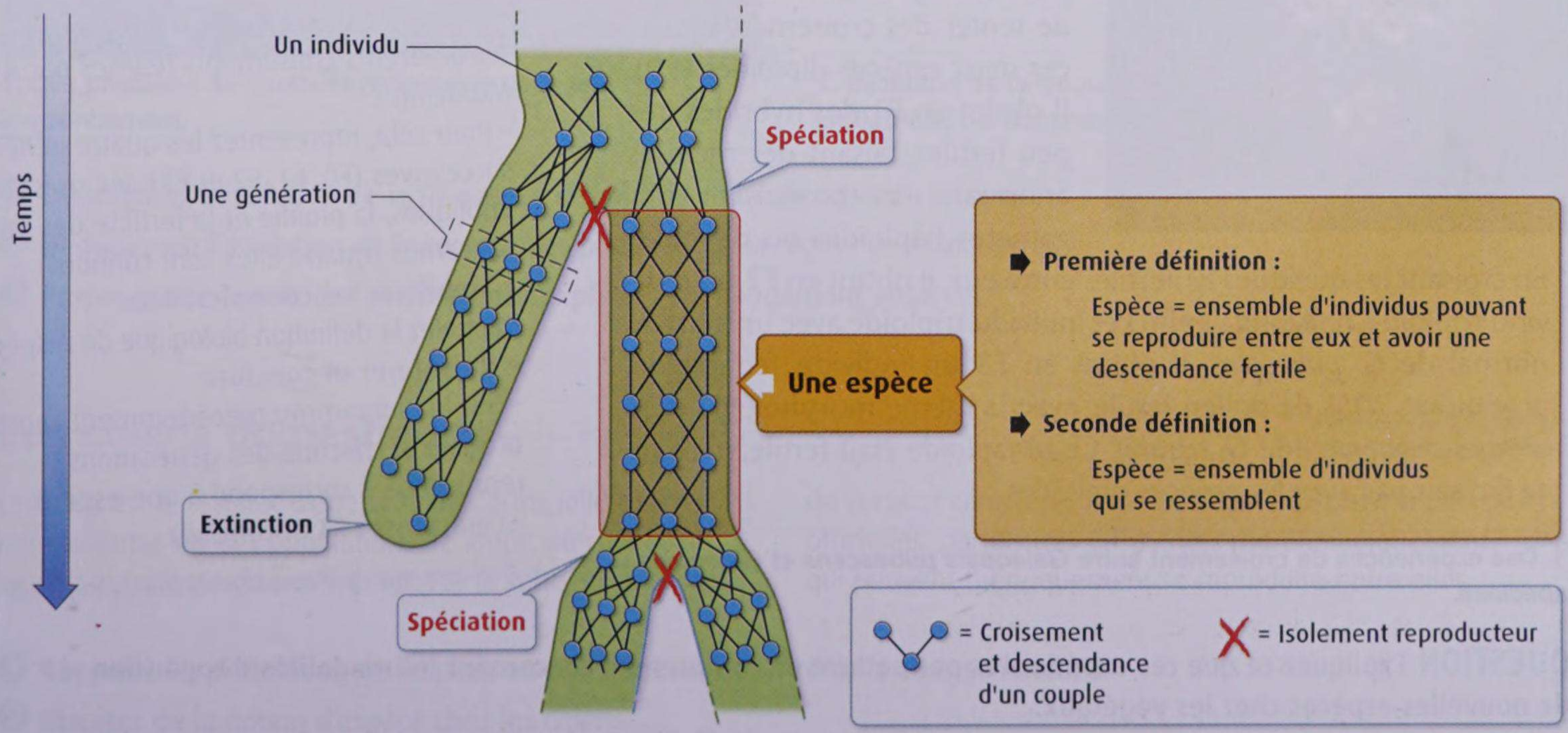
Sélection naturelle : évolution de la composition génétique d'une population sous l'effet de facteurs de l'environnement comme la température, la compétition, la prédation, etc.

L'essentiel par l'image

La diversification du vivant



La définition de l'espèce



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. L'évolution biologique :

a. est la transformation génétique des populations au cours du temps.
b. n'est pas attestée par des observations réelles.
c. est impossible si une population offre une grande diversité génétique.
d. peut être liée au hasard.

2. L'isolement reproducteur :

a. permet des échanges génétiques entres deux populations.
b. peut être dû à une non reconnaissance des parades nuptiales.
c. peut conduire à la formation d'une nouvelle espèce.

3. La définition typologique de l'espèce :

a. tient compte des ressemblances entre les individus.
b. tient compte de la capacité des individus à se reproduire entre eux.
c. n'est plus utilisée aujourd'hui.

4. Une espèce :

a. peut disparaître si tous les individus qui la composent disparaissent.
b. est stable dans le temps.
c. a une définition unique.

2 Qui suis-je ?

a. Un processus à l'origine de la modification génétique des populations dans lequel les conditions du milieu favorisent la reproduction et la survie de certains individus.
b. Un processus à l'origine de la modification génétique aléatoire des populations.
c. Une définition de l'espèce fondée sur le critère d'interfécondité.

3 Une phrase appropriée

Rédigez une phrase scientifiquement correcte en utilisant les termes suivants :

a. Reproducteur – modification – populations – isolement – deux – génétique – progressive.
b. Isolement – populations – gènes – empêche – reproducteur – échange.
c. Critère – biologique – espèce – interfécondité – définition.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 Différentes espèces de galeopsis en France

Dans la nature française, on trouve fréquemment un galeopsis tétraploïde (*Galeopsis tetrahit*, 4n=32) et moins souvent des espèces diploïdes (*Galeopsis pubescens* et *Galeopsis speciosa*, 2n=16).

Galeopsis tetrahit

En 1930, Arne Müntzing, constatant les ressemblances entre *G. pubescens* et *G. speciosa*, eu l'idée de tenter des croisements entre ces deux espèces diploïdes (F0). Il obtint en F1 des hybrides très peu fertiles, faisant des méioses anormales et produisant des gamètes haploïdes ou diploïdes En croisant les quelques F1 fertiles entre eux, il obtint en F2 un individu triploïde. Il féconda enfin cet individu triploïde avec un gamète normal de *G. pubescens*. Il obtint en F3 un individu tétraploïde, produisant 70 % de pollen fertile, avec la même morphologie et le même caryotype que *G. tetrahit*. Ce tétraploïde était fertile, mais ne se croisait pas avec les espèces diploïdes.

1. Des expériences de croisement entre *Galeopsis pubescens* et *Galeopsis speciosa*.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

– Présentez sous forme de diagramme les différents croisements réalisés par A. Müntzing.
– Pour cela, représentez les quatre générations successives (F0, F1, F2 et F3), les croisements impliqués, la ploïdie et la fertilité des individus concernés (quand elles sont connues).

• Mobiliser les connaissances

Rappelez la définition biologique de l'espèce.

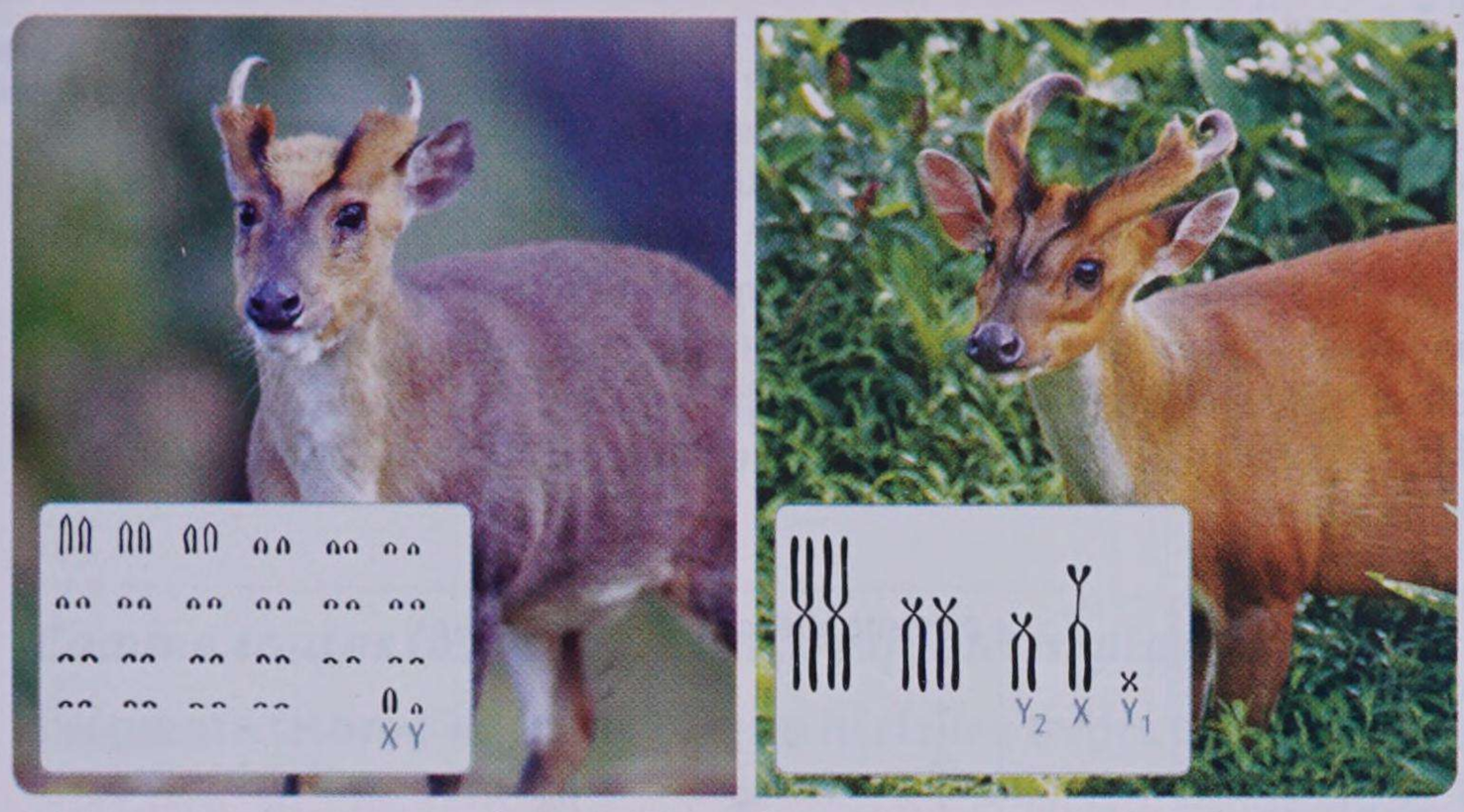
• Raisonner et conclure

– Sur le diagramme précédemment construit, précisez si chacune des générations représentées correspond à une espèce.
– Caractérisez F3 et concluez.

QUESTION Expliquez ce que ces expériences permettent de comprendre concernant les modalités d'apparition de nouvelles espèces chez les végétaux.

5 Deux populations de muntjac

Observer et raisonner



1. Les caryotypes des muntjacs de Chine (à gauche) et d'Inde (à droite).

Le muntjac de Chine et le muntjac d'Inde sont deux cervidés asiatiques. Morphologiquement, ils se ressemblent beaucoup. Génétiquement, il y a très peu de différences dans le nombre de leurs gènes. Néanmoins, leur hybridation est impossible.

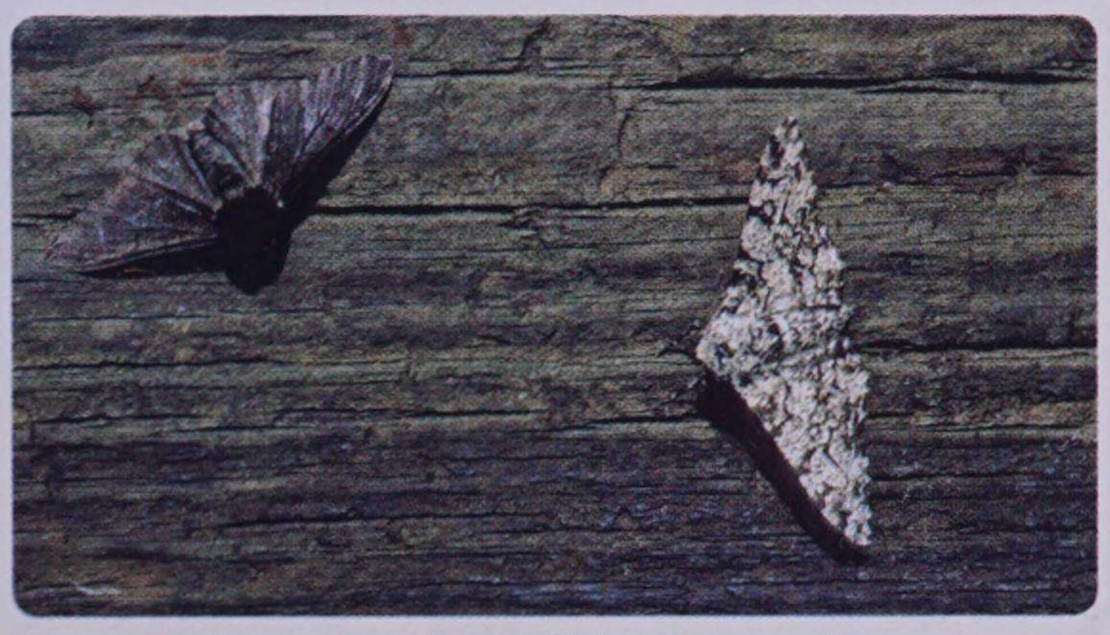
❶ En utilisant les documents, proposez une hypothèse expliquant l'absence de reproduction entre les deux populations de Muntjac.

❷ Précisez si le muntjac de Chine et le muntjac d'Inde sont deux espèces distinctes au sens biologique.

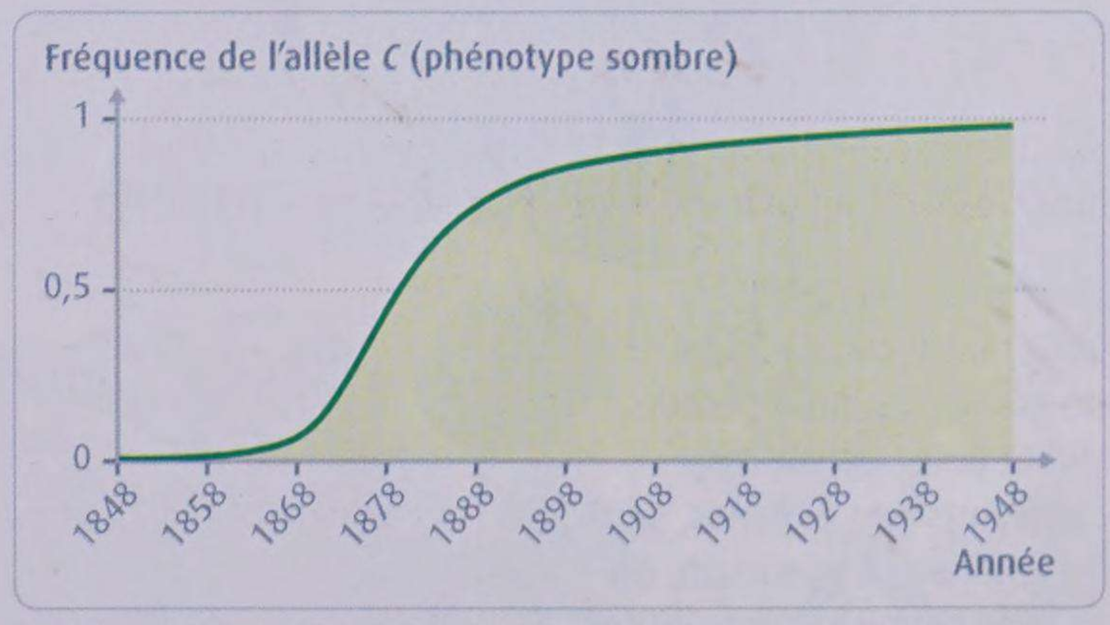
6 La phalène du bouleau

Formuler une hypothèse

La phalène du bouleau est un papillon de nuit qui se repose la journée sur les troncs d'arbre. Ces phalènes sont les proies habituelles des oiseaux, qui les picorent en venant les chercher sur les écorces. Il existe au sein des mêmes populations de phalène des individus clairs et des individus sombres. La couleur des phalènes est contrôlée par un gène, dont il existe deux variants alléliques : l'allèle *c*, responsable du phénotype clair, et l'allèle *C*, responsable du phénotype sombre. Dans les régions sans pollution, les écorces sont couvertes de lichens clairs. Si l'air est pollué, elles sont sans lichens, plus sombres (doc 1). En Angleterre, la pollution s'est développée à partir de la fin du XIXe siècle.



1. Des phalènes de couleurs différentes dans leur environnement.



2. Évolution de la fréquence de l'allèle *C* dans la région industrielle de Manchester.

❶ Caractérisez l'évolution de la fréquence des allèles *c* et *C* au cours du temps.

❷ Déduisez-en l'évolution de la couleur des phalènes de la région de Manchester.

❸ Proposez une hypothèse permettant d'expliquer le changement observé.

7 Les chiens domestiques

Utiliser ses connaissances

Le chien est le résultat d'une sélection artificielle exercée par l'Homme sur des populations de loups, au cours d'un processus nommé domestication. Par la suite, la sélection de certains caractères a été à l'origine de plus de 300 races officielles, parfois très différentes morphologiquement, qui peuvent théoriquement se reproduire entre elles.

❶ Rappelez les définitions de l'espèce en précisant sur quels critères elles se fondent.

❷ Discutez de la notion d'espèce chez les chiens.

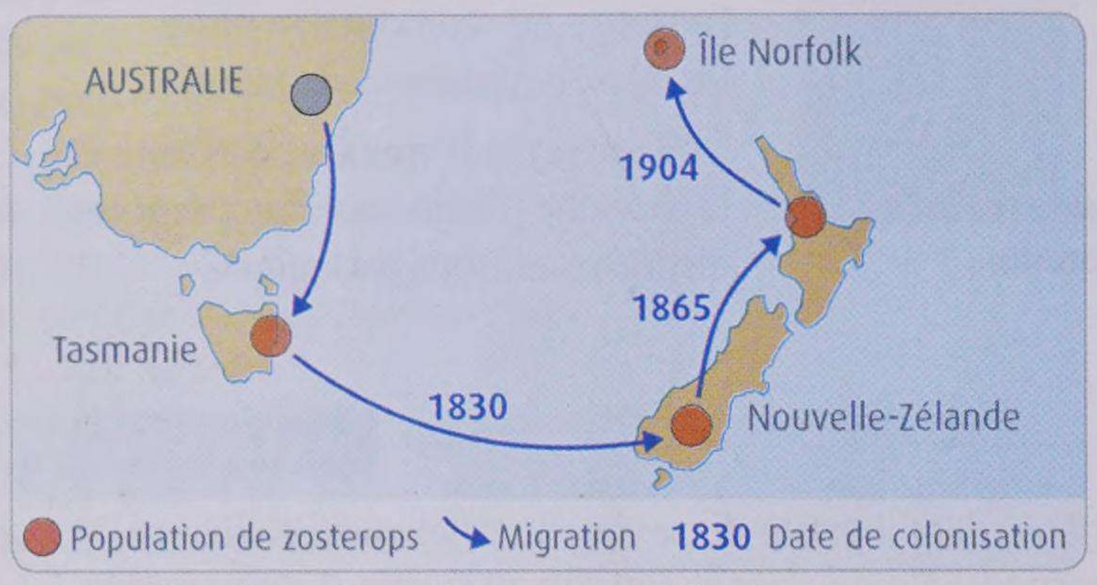
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

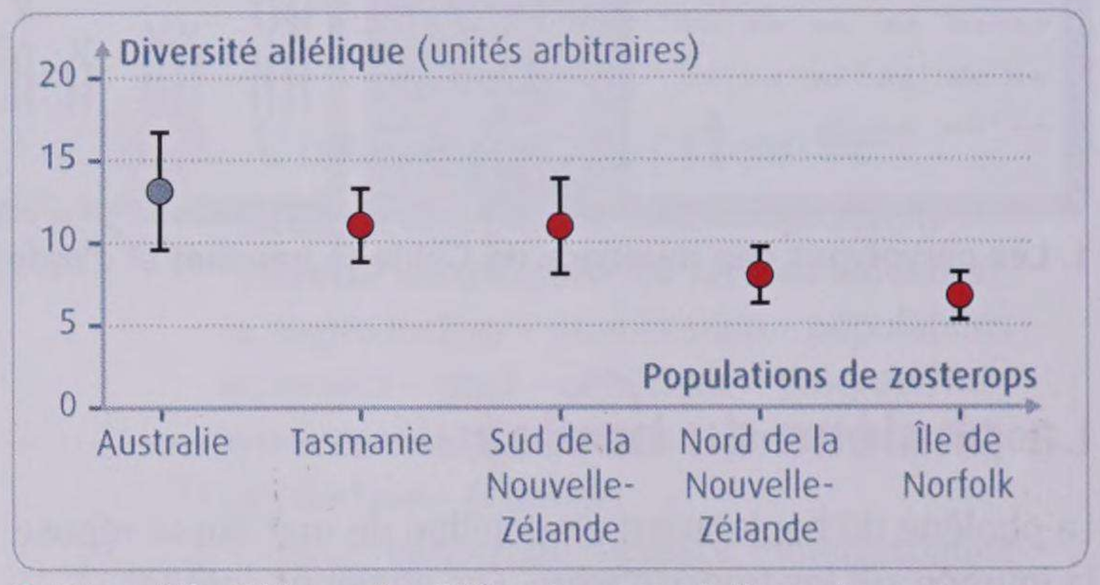
8 Migration et évolution du zosterops à dos gris

Mettre en relation des informations

Le zosterops à dos gris est un petit oiseau d'Australie. Des individus de cette espèce ont colonisé l'île de Tasmanie au début du XIXe siècle puis de là, la Nouvelle-Zélande, au sud et au nord, et enfin l'île de Norfolk. Comme cet oiseau vole mal sur de longues distances, on pense que seul un faible nombre d'individus est responsable de chaque colonisation. Des chercheurs ont évalué la diversité allélique de la population d'origine en Australie et de chaque population résultant d'une colonisation.



1. Les migrations du zosterops hors d'Australie.



2. Diversité allélique de différentes populations de zosterops.

1. Caractérisez la diversité allélique des populations résultant des différentes migrations présentées. Qualifiez et expliquez ce phénomène.

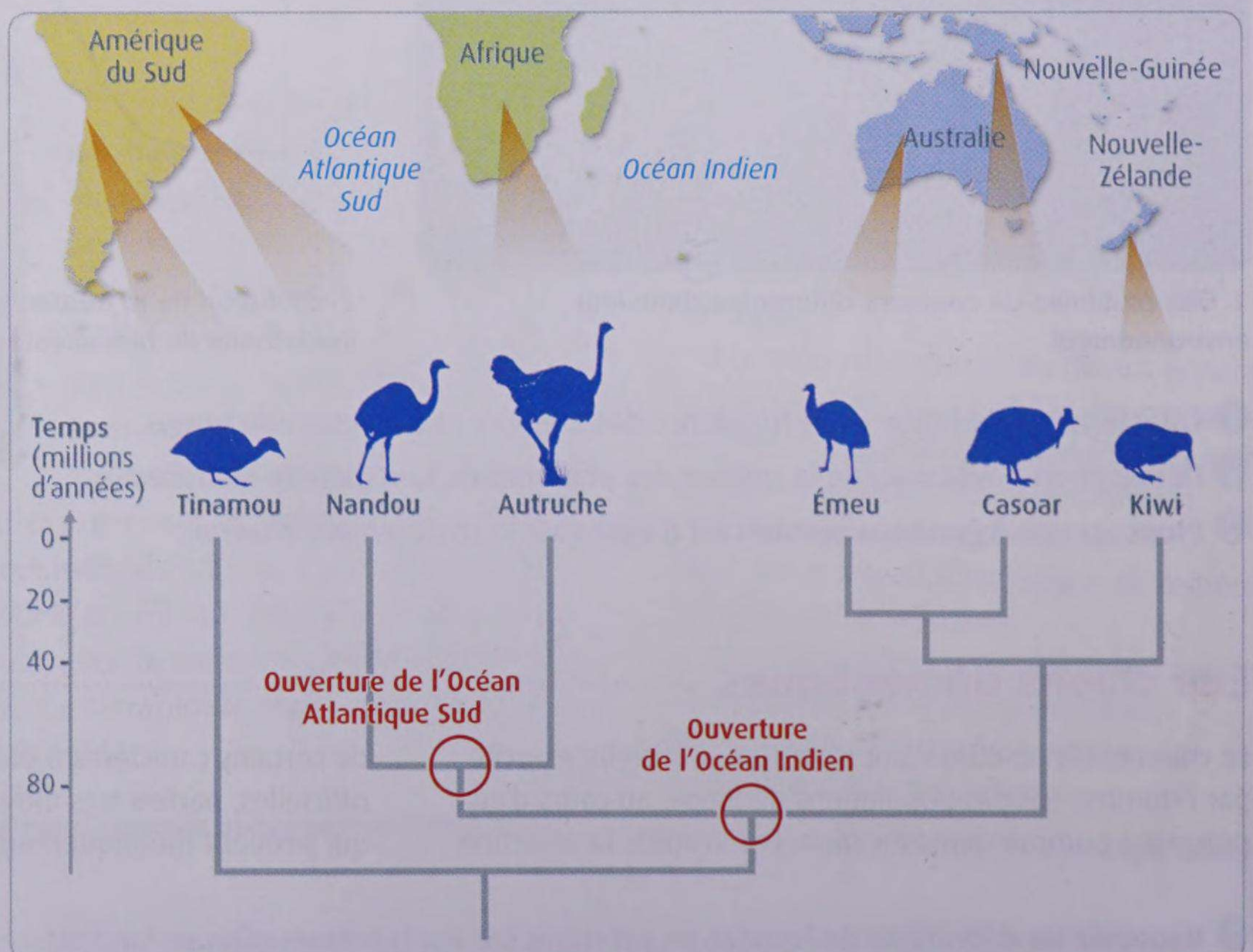
2. En considérant la petite taille des populations colonisatrices, justifiez que la diversité génétique des populations insulaires risque d'évoluer rapidement. Précisez le mécanisme évolutif impliqué.

9 L'origine des oiseaux coureurs

Raisonner

Charles Darwin (1809-1882) avait constaté que de grands oiseaux coureurs, vivant pourtant sur des continents très éloignés, se ressemblaient beaucoup. On appelle ces oiseaux les ratites. La construction de l'arbre phylogénétique montre la parenté des ratites (doc. 1). En observant les fossiles des différents groupes de ratites, on a pu dater les périodes de divergence entre ces groupes. On a indiqué sur l'arbre la date de quelques ouvertures océaniques.

Proposez une hypothèse pour expliquer le lien que l'on observe entre l'ouverture des océans et l'apparition de nouveaux groupes de ratites.



1. Phylogénie des ratites.

CHAPITRE 4

Un regard sur l'évolution de l'Homme

Comme toutes les espèces qui peuplent la planète Terre, l'Homme (Homo sapiens) a une histoire évolutive. Cette histoire, qui continue aujourd'hui de s'écrire, s'inscrit dans celle, plus large, des primates.

Moulages de crânes fossiles du genre *Homo* et du genre *Australopithecus*.

Quelles sont les grandes lignes de l'histoire évolutive de l'Homme ?

UNITÉ 1

La diversité actuelle et passée des primates

L'Homme est un primate de l'Ancien monde. Le groupe des primates comprend de nombreuses autres espèces, actuelles et fossiles.

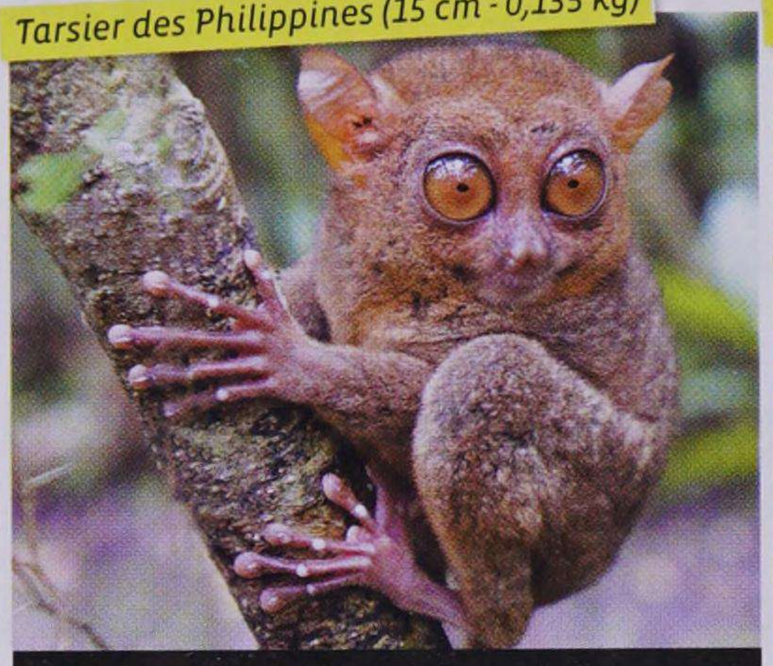
Comment caractériser la diversité des primates ?

La diversité actuelle des primates

PISTE

Maki (45 cm - 3,5 kg)

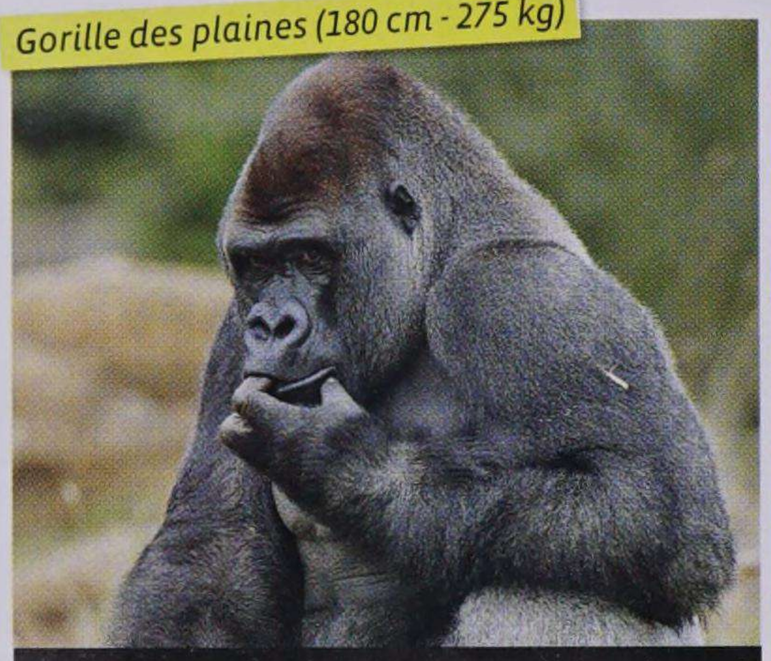
Forêts humides (Madagascar)


Tarsier des Philippines (15 cm - 0,135 kg)

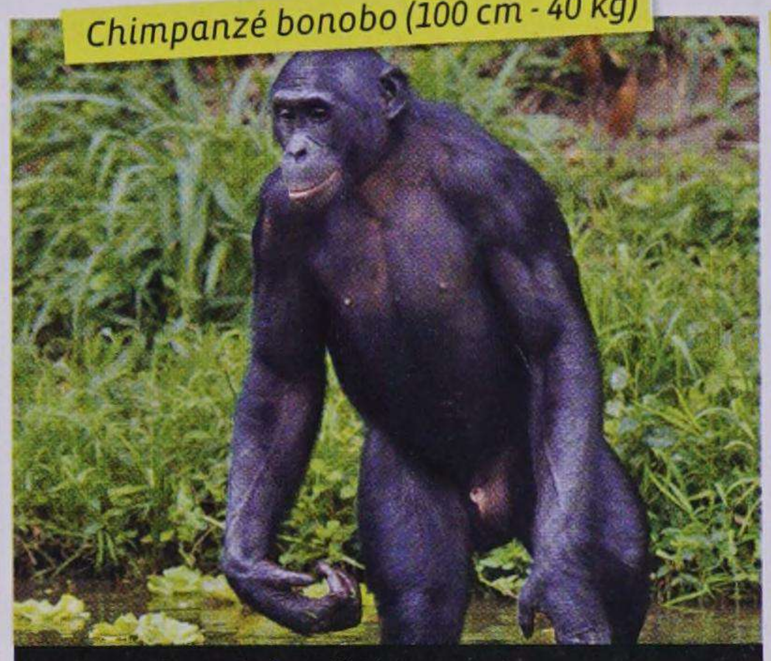
Forêts humides (Philippines)

Saki à face blanche (50 cm - 2 kg)

Forêts équatoriales (Amérique du Sud)


Gorille des plaines (180 cm - 275 kg)

Forêts équatoriales d'Afrique


Chimpanzé bonobo (100 cm - 40 kg)

Forêts équatoriales d'Afrique

Macaque rhésus (64 cm - 6 kg)

Habitats variés (Asie du sud-est)

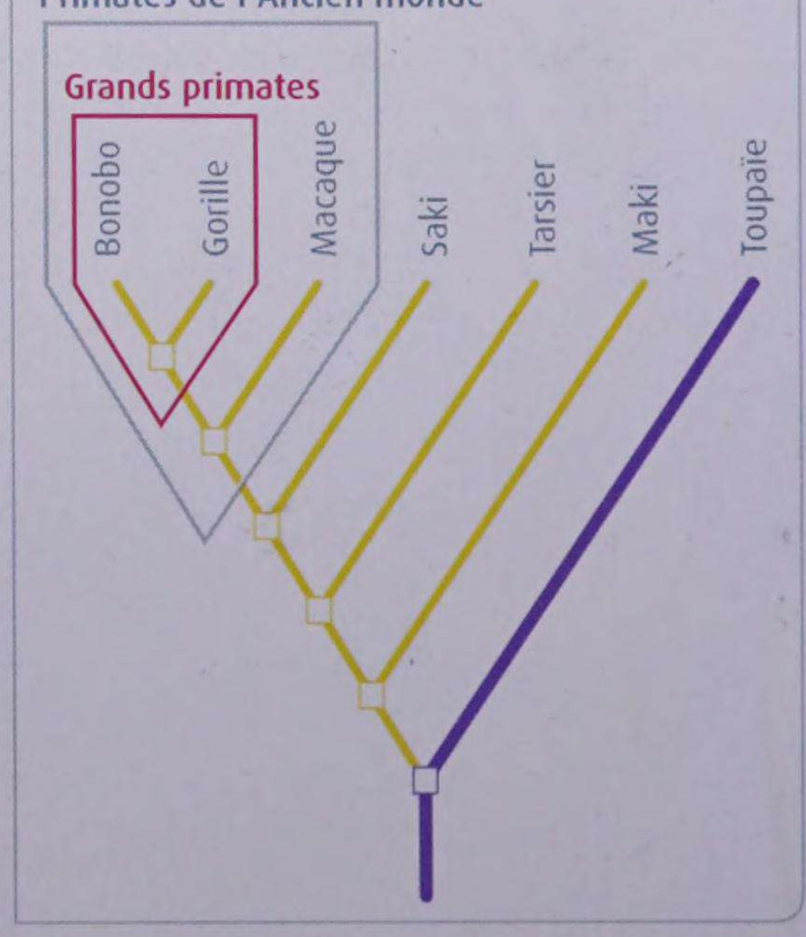
1 Quelques primates actuels.

TP J'UTILISE PHYLOGÈNE

	Pouce	Terminaisons des doigts	Appendice nasal	Orbites**	Narines	Queue
Bonobo	Opposable*	Ongles	Nez	Fermées	Proches	Absente
Gorille	Opposable	Ongles	Nez	Fermées	Proches	Absente
Macaque	Opposable	Ongles	Nez	Fermées	Proches	Présente
Saki	Opposable	Ongles	Nez	Fermées	Écartées	Présente
Tarsier	Opposable	Ongles	Nez	Ouvertes	Écartées	Présente
Maki	Opposable	Ongles	Truffe	Ouvertes	Écartées	Présente
Toupaïe	Non opposable	Griffes	Truffe	Ouvertes	Écartées	Présente

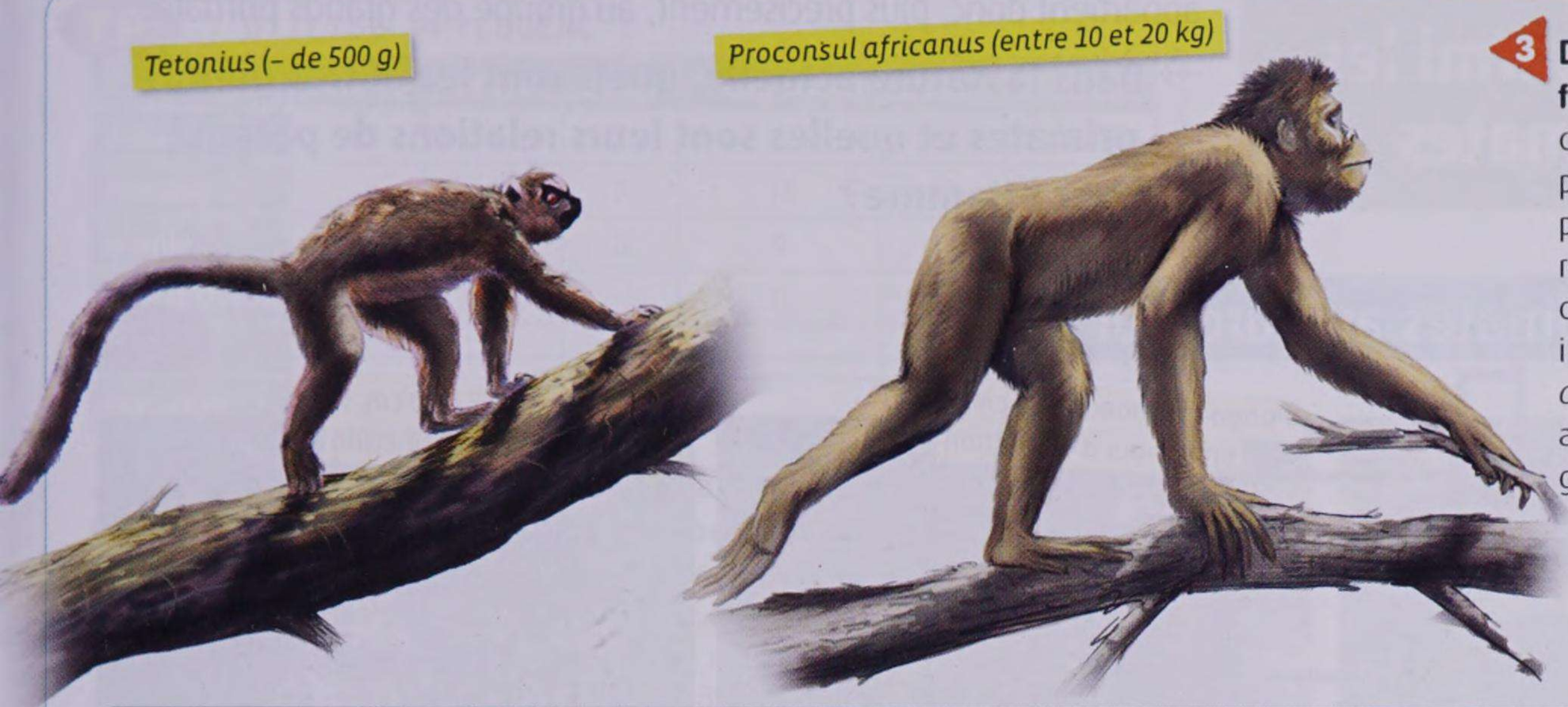
*Pouce opposable aux autres doigts.

**Chez les primates, la cavité orbitaire peut présenter une fenêtre qui s'ouvre vers l'arrière du crâne (orbites ouvertes) ou être fermée (orbites fermées, comme chez l'Homme).

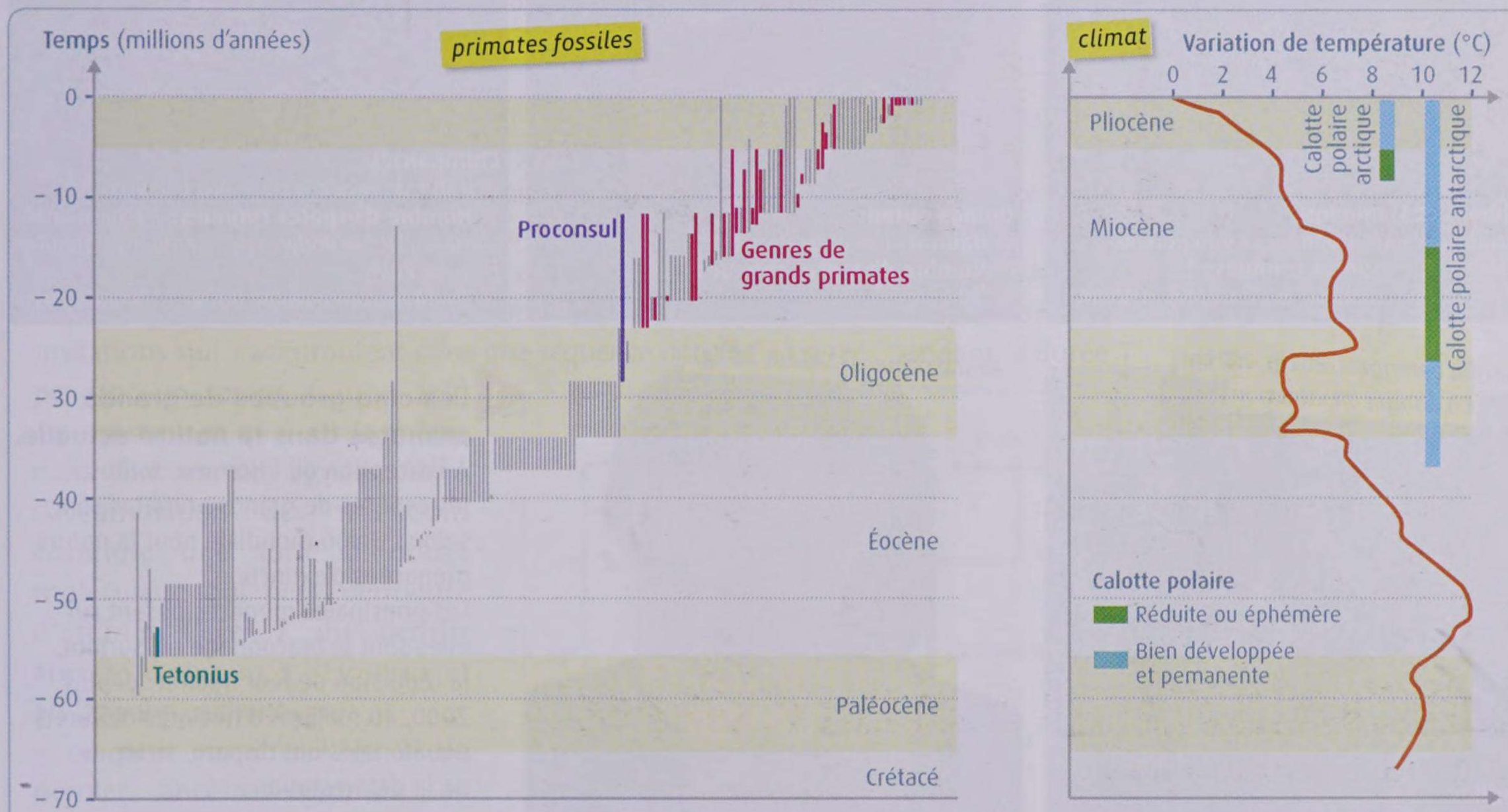


2 L'état de quelques caractères morphologiques chez sept mammifères actuels et l'arbre de parenté correspondant. Le toupaïe est un mammifère proche parent des primates.

La diversité passée des primates



3 Deux primates fossiles. *Tetonius*, âgé de 50-55 Ma, est un des plus anciens genres de primates connus. C'est un représentant d'un groupe de primates qui s'est éteint il y a 34 Ma. *Proconsul africanus*, âgé de 20 Ma, appartient au groupe des grands primates.



4 Répartition temporelle des primates fossiles et évolution climatique depuis 65 Ma. On compte aujourd'hui plus de 190 espèces de primates. Les découvertes paléontologiques ont permis d'identifier environ 380 espèces de primates fossiles appartenant à près de 200 genres, dont 66 espèces de grands primates. Ces derniers émergent dans le registre fossile vers – 20 Ma. Vers – 16 Ma, ils colonisent le sud de l'Eurasie, où ils connaissent une forte diversification en nombre d'espèces. Vers – 8 Ma, ils disparaissent d'Eurasie, sauf en Asie du sud-est. Aujourd'hui, les grands primates sont, à l'exception de l'Homme, inféodés aux forêts des zones tropicales et subtropicales (chaudes et humides) d'Afrique et d'Eurasie. Leur diversité est réduite (8 genres et une vingtaine d'espèces).

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Recopiez l'arbre de parenté (doc. 2) et placez-y les changements d'état des caractères étudiés. Placez le dernier ancêtre commun de tous les primates et donnez ses caractéristiques. Déduisez-en les caractères propres aux primates.

2 **DOC. 2.** Placez l'Homme dans l'arbre de parenté des primates.

3 **DOC. 3 ET 4.** Décrivez l'évolution de la biodiversité des primates.

4 **DOC. 4.** Formulez une hypothèse pouvant expliquer l'évolution de la biodiversité des grands primates.

5 **EN CONCLUSION.** Résumez l'ensemble de vos observations et précisez la position systématique l'Homme au sein des primates.

UNITÉ 2

La place de l'Homme parmi les grands primates

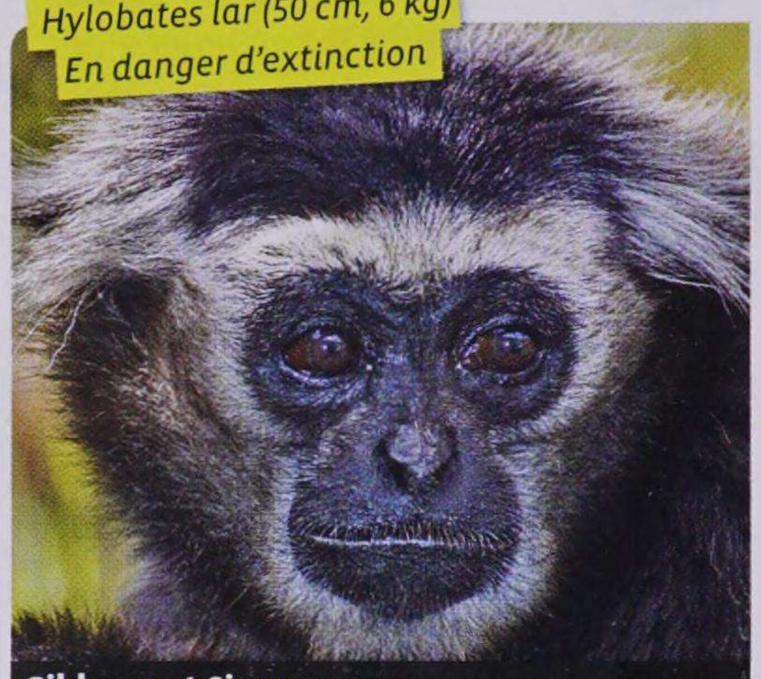
L'Homme est un mammifère possédant des ongles et un pouce opposable, ce qui fait de lui un primate. Il est dépourvu de queue et appartient donc, plus précisément, au groupe des grands primates.

Dans la nature actuelle, quels sont les autres grands primates et quelles sont leurs relations de parenté avec l'Homme ?

Les grands primates aujourd'hui

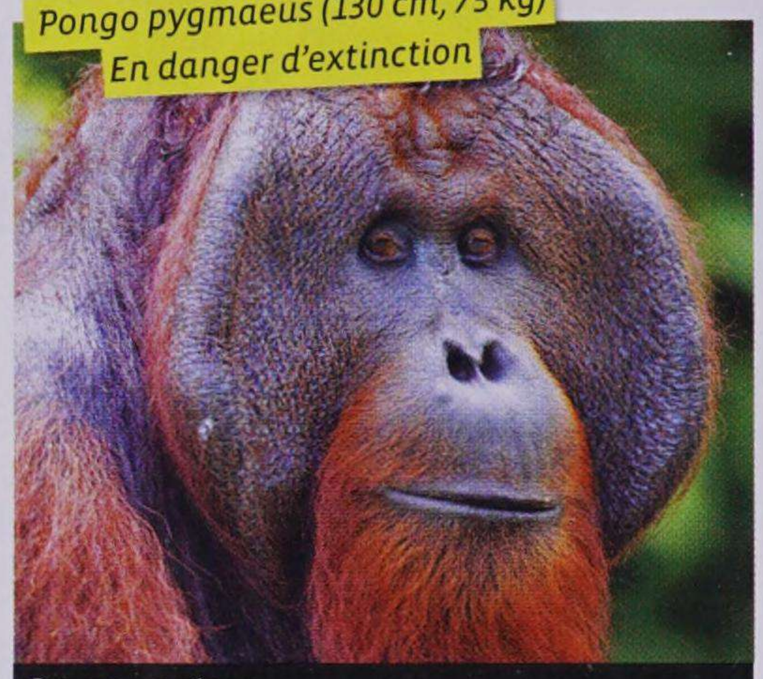
PISTE

Hylobates lar (50 cm, 6 kg)
En danger d'extinction



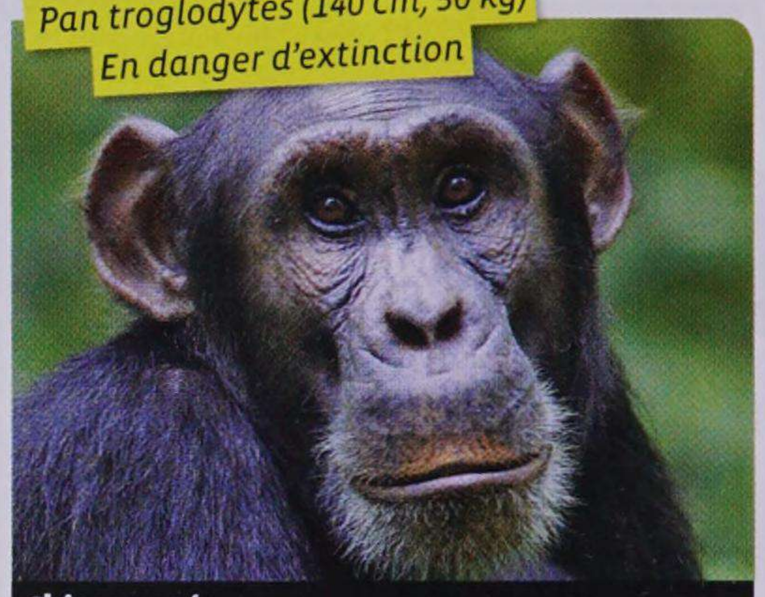
Gibbons et Siamangs
- **Habitat :** forêt tropicale et équatoriale.
- **Nombre d'espèces connues :** 13
- Vivent en famille sur un territoire restreint

Pongo pygmaeus (130 cm, 75 kg)
En danger d'extinction



Orangs-outans
- **Habitat :** forêt équatoriale
- **Nombre d'espèces connues :** 2
- Solitaires

Pan troglodytes (140 cm, 50 kg)
En danger d'extinction

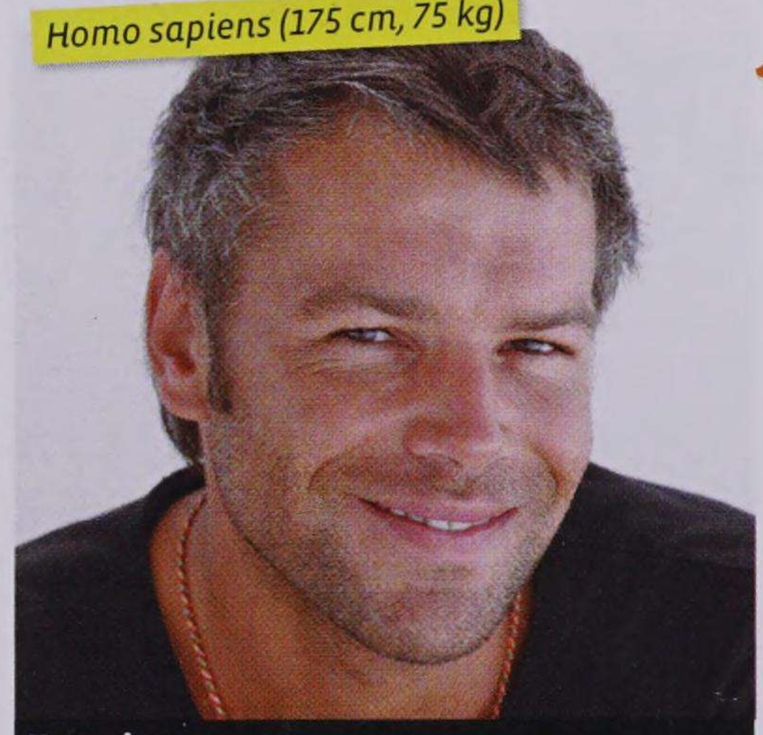


Chimpanzés
- **Habitat :** savane arborée, forêt équatoriale
- **Nombre d'espèces connues :** 2 (chimpanzé commun [*P. troglodytes*] et chimpanzé bonobo [*P. paniscus*])
- Vivent en communauté (jusqu'à 100 individus)

Gorilla berengei (230 cm, 250 kg)
En danger d'extinction

Gorilles
- **Habitat :** forêt équatoriale
- **Nombre d'espèces connues :** 2
- Vivent en petite communauté de 10 à 15 individus

Homo sapiens (175 cm, 75 kg)



Humains
- **Habitat :** tous les milieux.
- **Nombre d'espèces :** 1

1 Les cinq groupes de grands primates dans la nature actuelle. À l'exception de l'Homme, toutes les espèces de grands primates sont, selon l'Union mondiale pour la nature, menacées d'extinction.
Les principales menaces pesant sur elles sont le braconnage et, surtout, la réduction de leur habitat : depuis 2000, 40 millions d'hectares de forêts équatoriales ont disparu, victimes de la déforestation.

2 Aires de répartition des grands primates actuels (humains non compris).

Les relations de parenté entre les grands primates

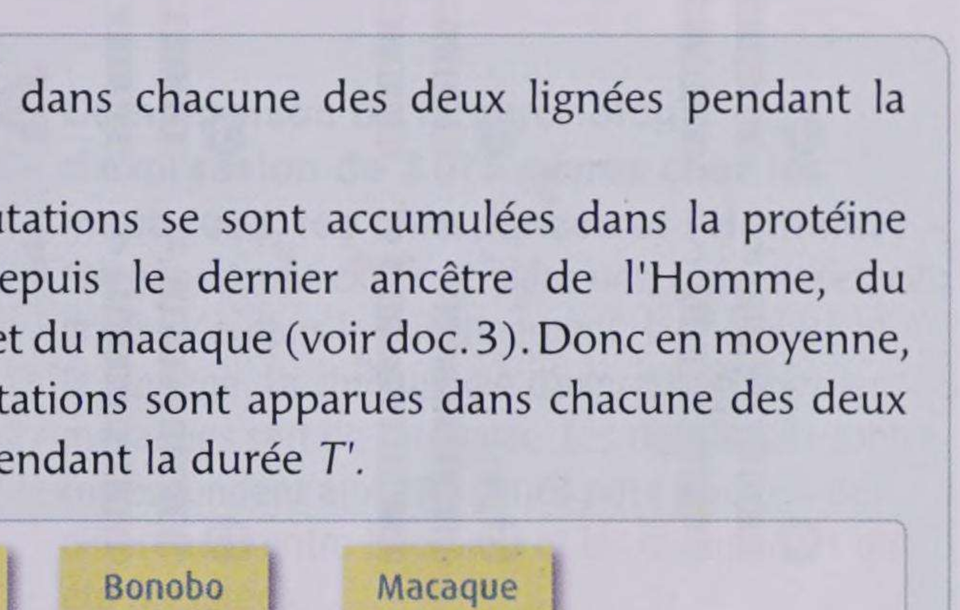
PISTE

TP J'UTILISE PHYLOGÈNE

	Bonobo	Homme	Gorille	Orang-Outan	Gibbon	Macaque
Bonobo	0	6	7	12	14	27
Homme		0	7	14	13	27
Gorille			0	9	14	28
Orang-Outan				0	14	28
Gibbon					0	25
Macaque						0

3 Comparaison d'une portion de la séquence de la protéine COX2 chez six primates et arbre de parenté correspondant.

Chaque chiffre indique le nombre d'acides aminés qui diffèrent entre les séquences prises deux à deux. Moins il y a de différences entre les séquences d'un même gène (donc d'une même protéine) chez deux espèces, plus elles sont proches parentes (bonobo = chimpanzé bonobo).

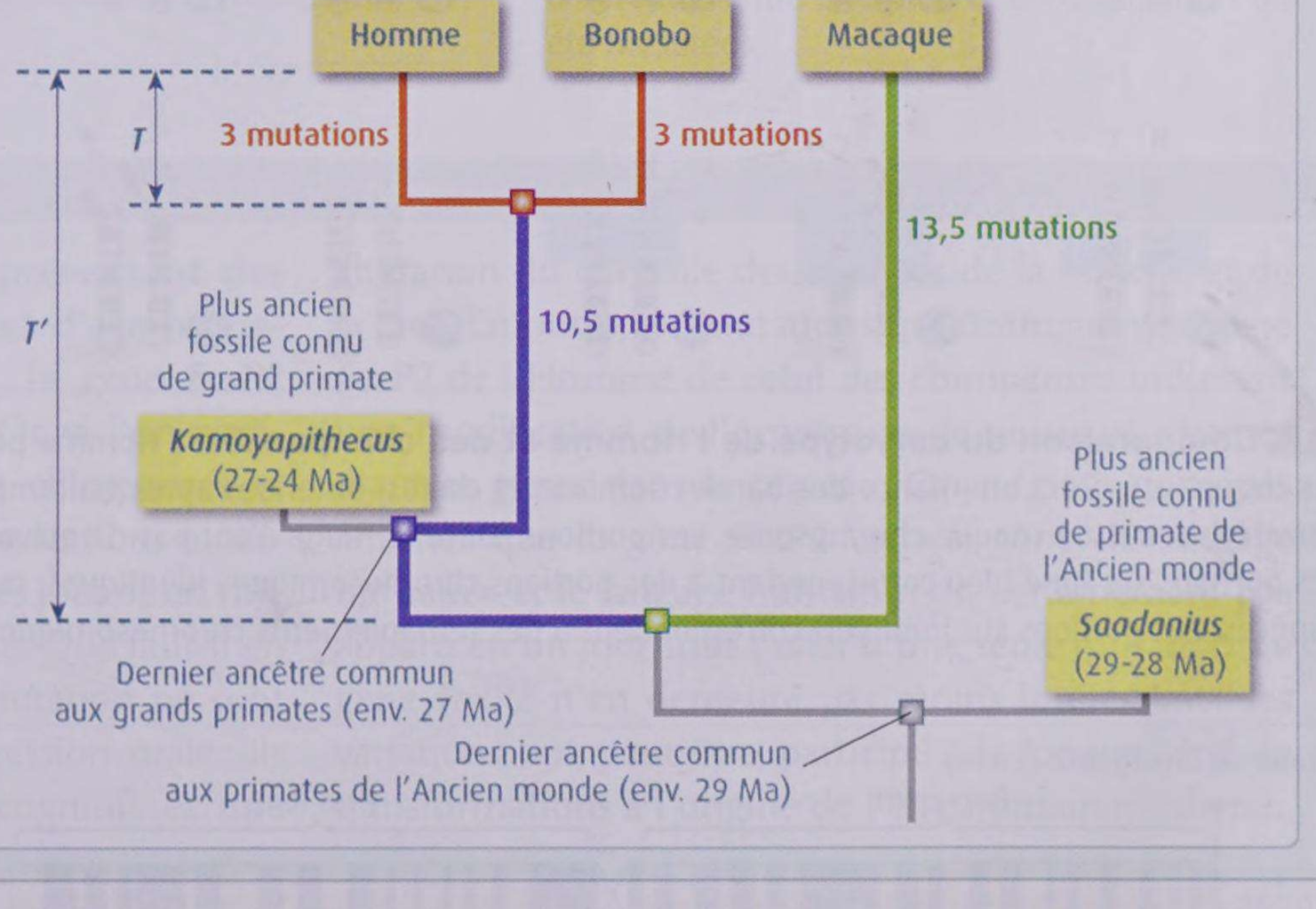


La datation du dernier ancêtre commun à l'Homme et aux chimpanzés à partir des primates fossiles n'est pas aisée. L'apport de données moléculaires est donc précieux. On considère les lignées menant au macaque, au bonobo et à l'Homme. On peut faire l'hypothèse que, sur certains gènes, le taux de mutation u (nombre m de mutations qui s'accumulent dans une séquence donnée pendant un temps t: $u = m/t$) est constant et qu'il est le même dans chacune des lignées. Alors, l'accumulation des mutations constitue une sorte d'horloge moléculaire qui peut permettre d'estimer l'âge T du dernier ancêtre commun à l'Homme et au bonobo sachant que :

– on peut encadrer l'âge T' du dernier ancêtre commun au macaque, à l'Homme et au bonobo grâce aux fossiles ;

– 6 mutations distinguent la protéine COX2 de l'Homme et du bonobo (voir doc. 3). Donc en moyenne, 3 mutations sont apparues dans chacune des deux lignées pendant la durée T ;

– 27 mutations se sont accumulées dans la protéine COX2 depuis le dernier ancêtre de l'Homme, du bonobo et du macaque (voir doc. 3). Donc en moyenne, 13,5 mutations sont apparues dans chacune des deux lignées pendant la durée T'.



4 Dater le dernier ancêtre commun de l'Homme et du bonobo.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Résumez les principales caractéristiques des grands primates dans la nature actuelle.

2 **DOC. 3.** Déterminez le plus proche parent de l'Homme dans la nature actuelle.

3 **DOC. 4.** Donnez une estimation de l'âge du dernier ancêtre commun de l'Homme et de son plus proche parent dans la nature actuelle.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les informations sur la place de l'Homme au sein des grands primates dans la nature actuelle.

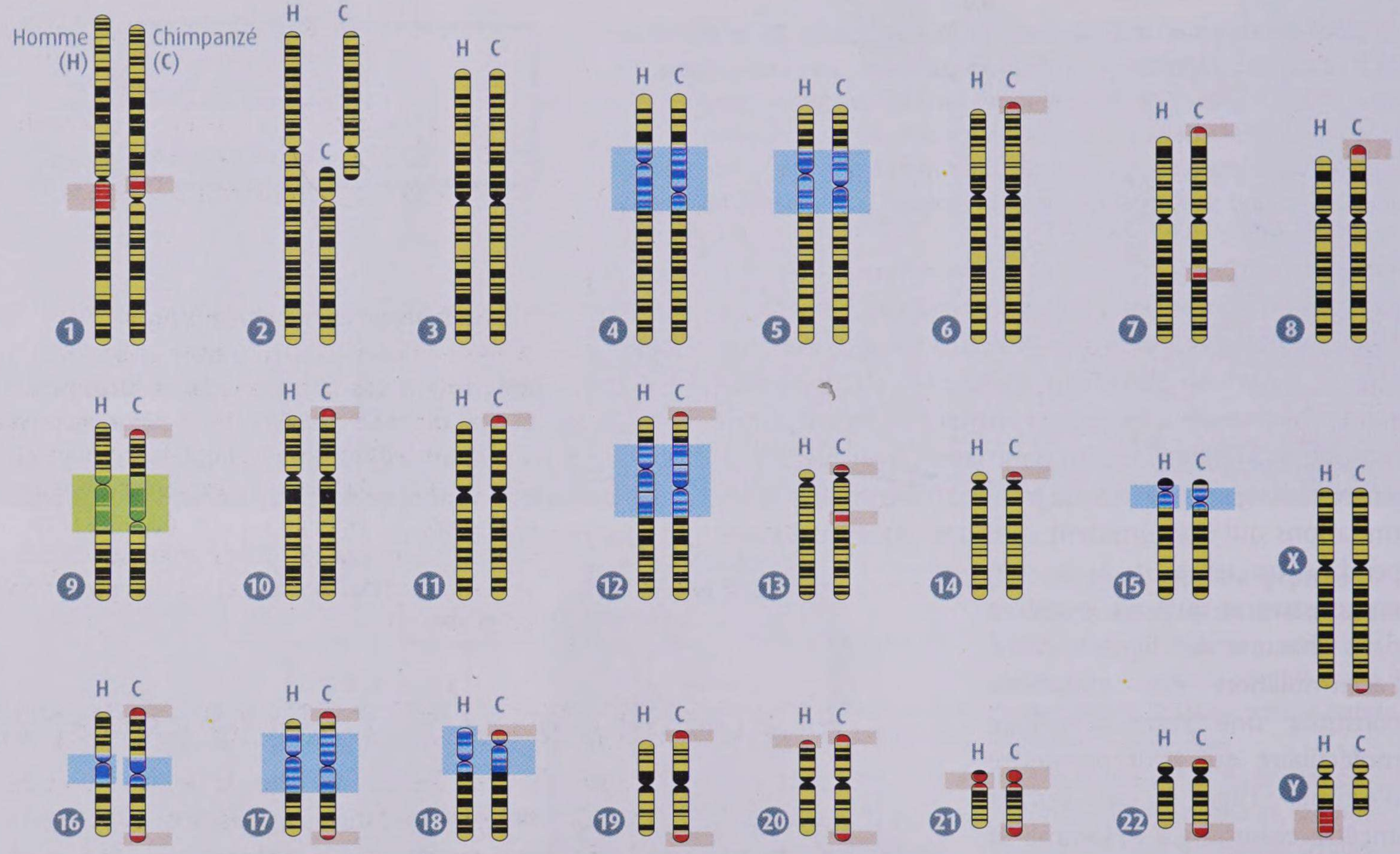
UNITÉ 3

La comparaison génétique entre Homme et chimpanzés

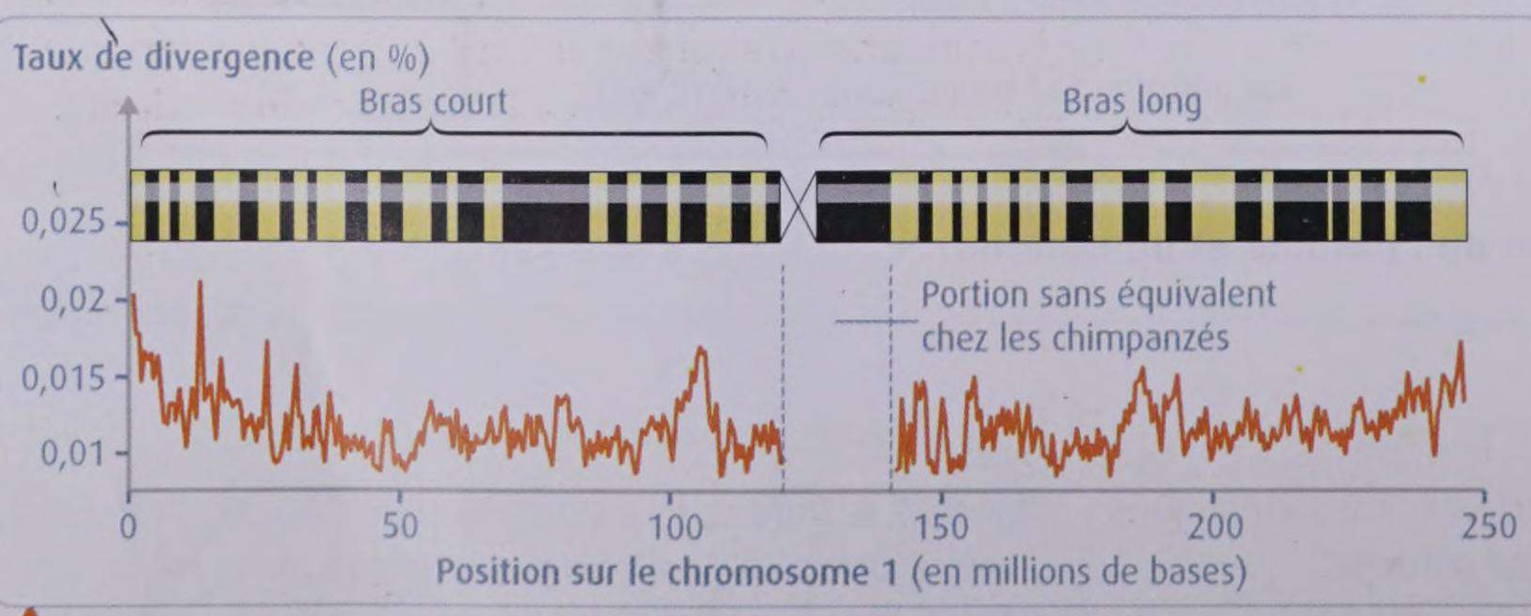
Parmi les primates actuels, les deux espèces de chimpanzé (chimpanzé commun et chimpanzé bonobo) sont les plus proches parentes de l'Homme.

Quelles sont les différences génétiques entre l'Homme et les chimpanzés ?

Comparer la structure du génome de l'Homme et des chimpanzés



1 Comparaison du caryotype de l'Homme et des chimpanzés. L'Homme possède 23 paires de chromosomes, les chimpanzés 24. L'alternance des bandes sombres et claires, obtenues après traitement avec un colorant, produit des motifs caractéristiques de chaque chromosome. Les portions sur fond rouge n'ont pas d'équivalent chez l'une des deux espèces. Les portions sur fond bleu correspondent à des portions chromosomiques identiques, mais en orientation inverse chez les deux espèces. Les portions sur fond vert correspondent à des remaniements chromosomiques complexes.



2 Comparaison de la séquence nucléotidique du chromosome 1 de l'Homme et des chimpanzés. Le taux de divergence correspond à la proportion de nucléotides qui diffèrent quand on compare la séquence simienne à la séquence humaine (chromosome représenté). Il est calculé sur des fragments d'un million de nucléotides.

- 98,5 % des nucléotides sont identiques dans le génome de l'Homme et des chimpanzés.
- Les 1,5 % de différences correspondent à 35 millions de mutations ponctuelles, 5 millions d'insertions ou délétions et à de nombreux remaniements chromosomiques.

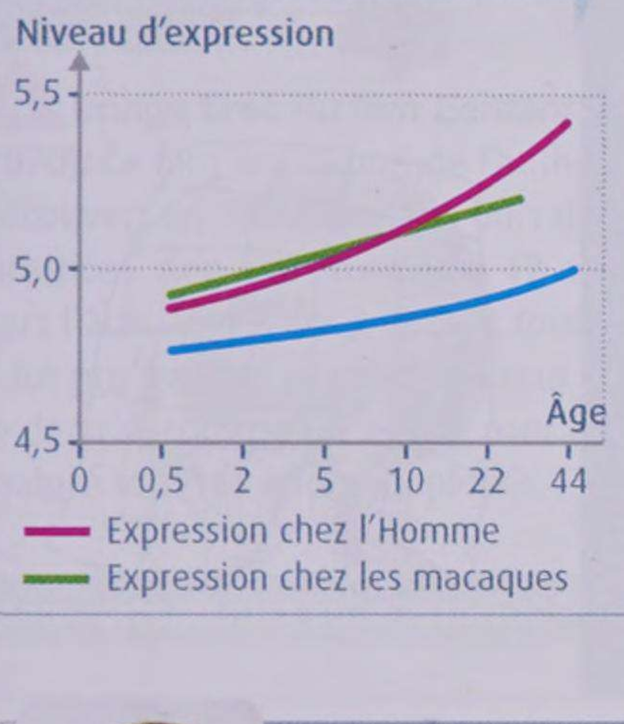
3 Quelques chiffres.

Comparer l'expression du génome de l'Homme et des chimpanzés

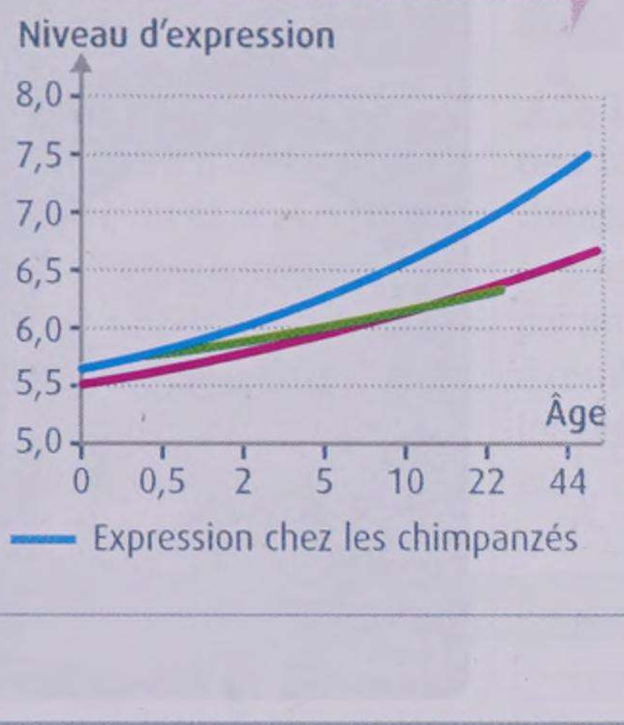
Pour 38 % des gènes, l'expression augmente moins vite chez l'Homme que chez les chimpanzés et les macaques

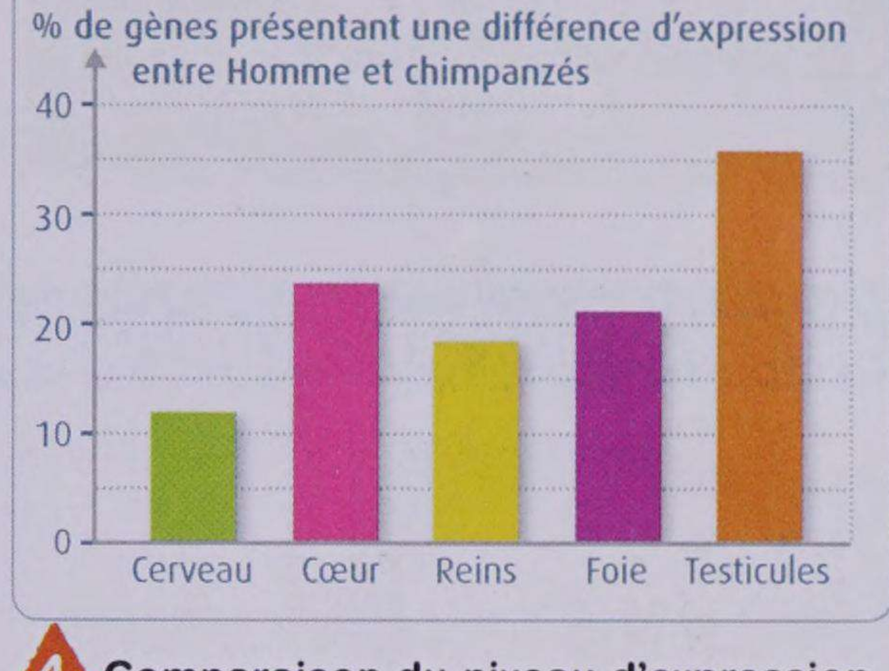
Pour 20 % des gènes, l'expression augmente plus vite chez l'Homme que chez les chimpanzés et les macaques

Pour 24 % des gènes, l'expression augmente moins vite chez les chimpanzés que chez l'Homme et les macaques



Pour 18 % des gènes, l'expression augmente plus vite chez les chimpanzés que chez l'Homme et les macaques





4 Comparaison du niveau d'expression de 21 000 gènes chez l'Homme et les chimpanzés dans différents organes.

5 Comparaison de la chronologie d'expression de 3 075 gènes chez les macaques, les chimpanzés et l'Homme.
Ces gènes sont exprimés dans une zone du cerveau impliquée dans le raisonnement, la mémoire et le langage. La chronologie d'expression chez les macaques sert de référence. Les données ci-contre correspondent aux 299 gènes pour lesquels des différences entre l'Homme et les chimpanzés ont été mesurées.

Interview de **Michel Morange,** biologiste et historien des sciences.

Chez certains enfants présentant des difficultés d'élocution et d'apprentissage de la grammaire, le gène *FoxP2* présente des mutations. Or, si l'on compare la séquence de ce gène chez les chimpanzés et chez l'Homme, on constate que deux mutations modifient, chez l'Homme, deux acides aminés jouant un rôle essentiel dans la fonction de la protéine. Que faut-il en conclure ? Les enfants présentant la mutation ne sont pas affectés seulement dans leur expression orale : ils présentent un ensemble de déficits cognitifs et une altération du contrôle des muscles de la bouche et de la face. En outre, les mutations qui distinguent le gène *FoxP2* de l'Homme de celui des chimpanzés induisent une modification de l'expression de plusieurs dizaines d'autres gènes dans le cerveau. On ne peut donc pas affirmer que le gène *FoxP2* est « *le* gène du langage humain » et le langage humain n'est certainement pas apparu en un jour sous l'effet d'une seule mutation. Le gène *FoxP2* n'en demeure pas moins intéressant : ses variations ont, peut-être, participé à la longue série de transformations à l'origine de l'être humain moderne.

6 Y a-t-il un « gène du langage » ?

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À partir des documents de la double page, comparez l'Homme et les chimpanzés d'un point de vue génétique.

Pour cela, vous pouvez :
- comparer le génome de l'Homme et celui des chimpanzés en termes de structure, de séquence et de chronologie d'expression des gènes **(DOC. 1 À 5)** ;
- montrer à l'aide d'un exemple les difficultés d'interprétation des différences génétiques constatées **(DOC. 6)**.

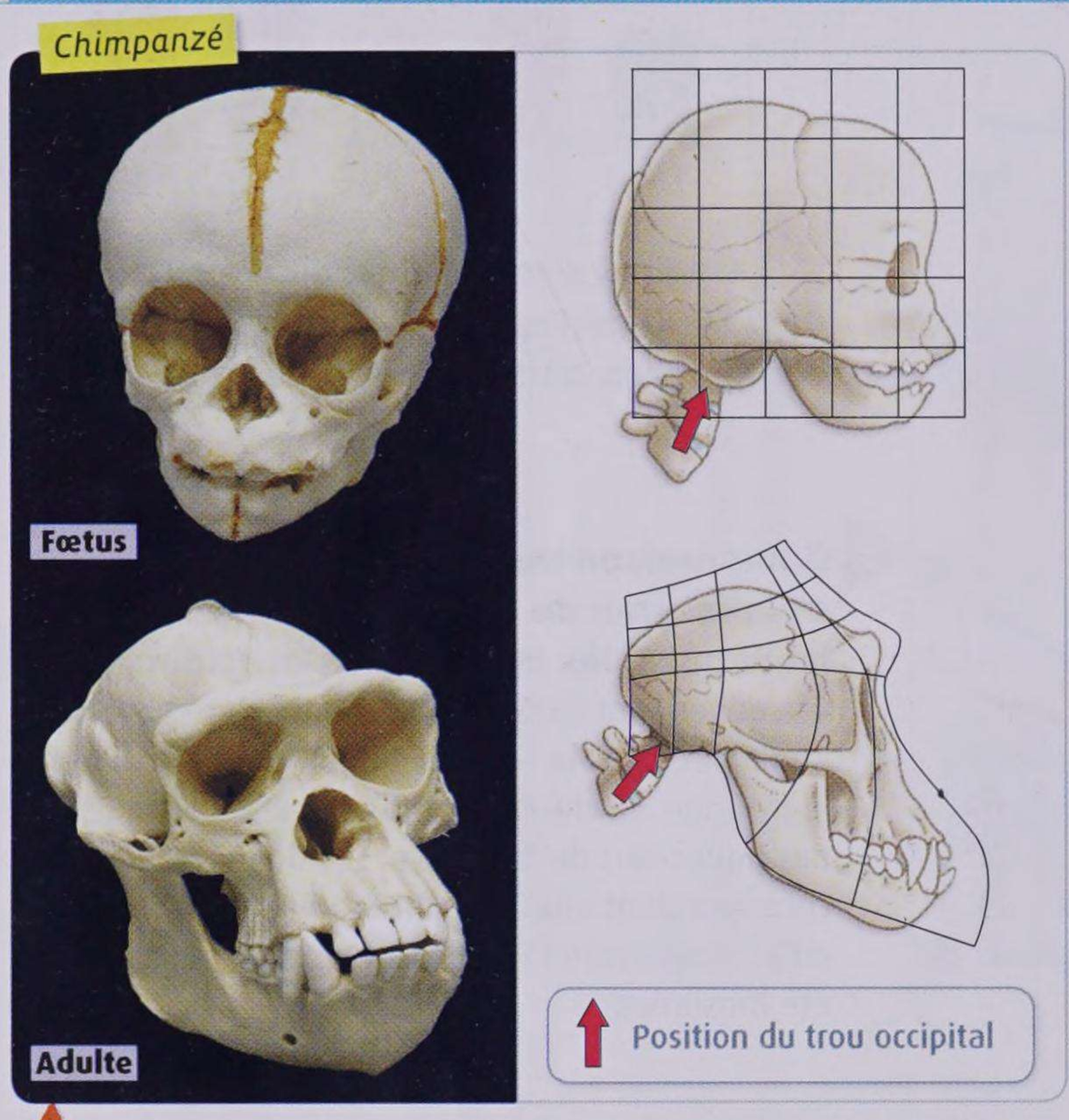
UNITÉ 4

La construction du phénotype des grands primates

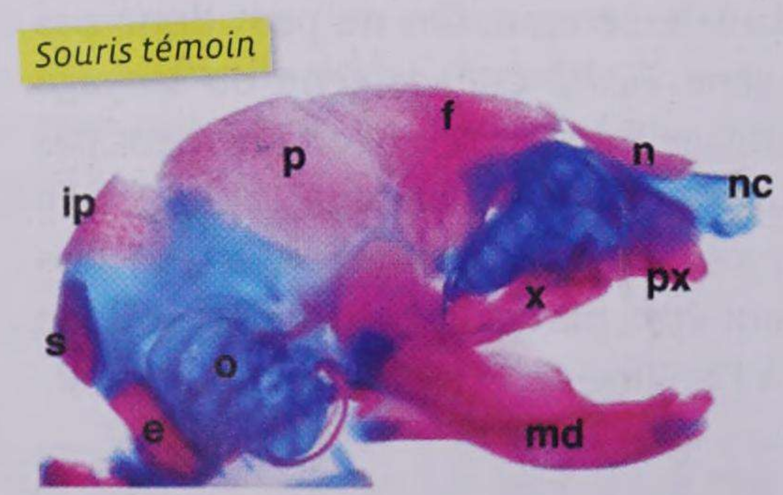
L'Homme est génétiquement très proche des chimpanzés et, dans une moindre mesure, des autres grands primates.

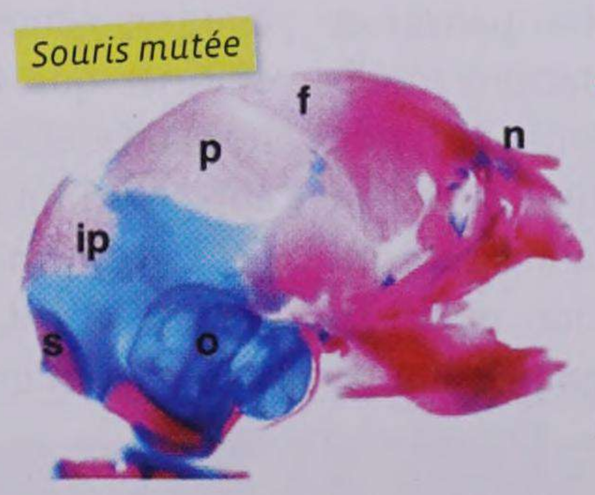
Comment se construit le phénotype de l'Homme et de ses plus proches parents dans la nature actuelle ?

La construction du phénotype morphologique

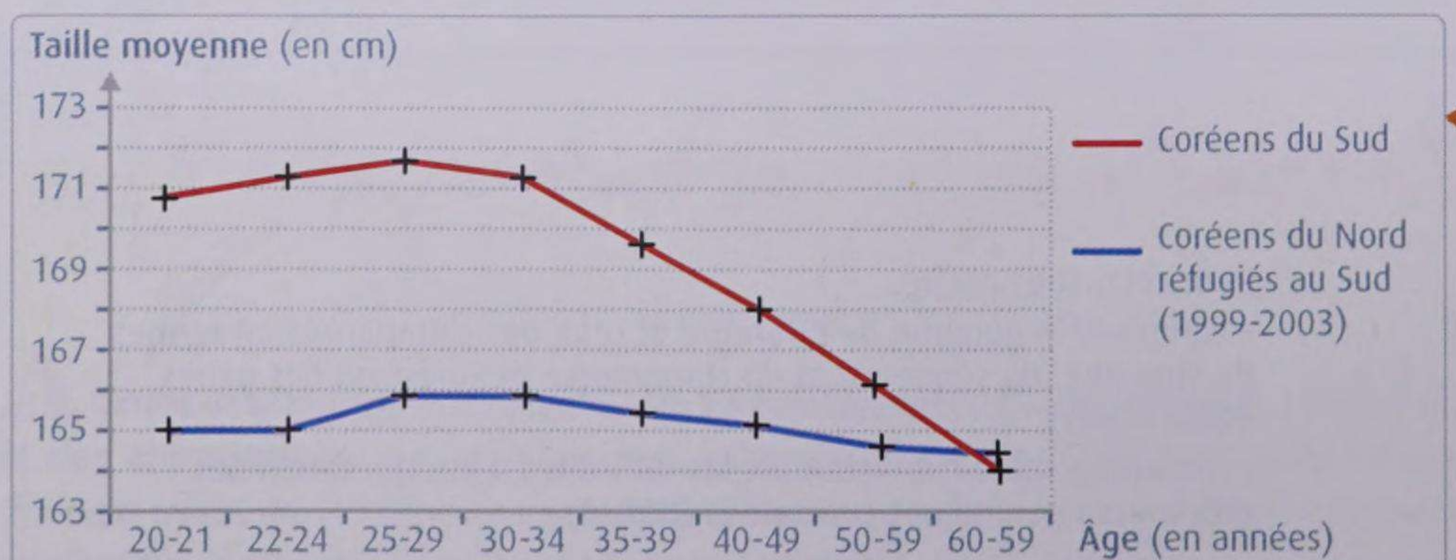


1 Comparaison du crâne du fœtus et de l'adulte chez l'Homme et un chimpanzé. Lors du développement post-natal, certaines parties du crâne ne se développent pas de la même façon. L'une des conséquences est que, chez un chimpanzé, la zone où le crâne s'articule avec la colonne vertébrale (trou occipital) migre vers l'arrière vers l'âge de trois ans, alors que chez l'Homme, le trou occipital reste centré sous le crâne. La tête est ainsi à l'aplomb du reste du corps, ce qui constitue un caractère lié à la station bipède.





2 Le contrôle de la morphogenèse du crâne. Les images ci-contre présentent le crâne d'un embryon âgé de 18,5 jours chez une souris témoin et chez une souris dont les deux allèles d'un gène (*Sox9*) ont été inactivés. Le résultat obtenu est généralisable aux autres mammifères. (Lettres et couleurs distinguent les différents os crâniens.)



3 L'effet de l'alimentation sur la taille. Des Coréens du Nord ont été mesurés à leur arrivée en Corée du Sud entre 1999 et 2003. Leur taille moyenne est comparée, par classe d'âge, à celle d'individus nés et élevés en Corée du Sud. Depuis la séparation des deux Corées en 1953, les conditions alimentaires se sont régulièrement améliorées en Corée du Sud.

La construction du phénotype comportemental

4 Image tirée du film *L'enfant sauvage* (François Truffaut, 1970). Ce film est inspiré de l'authentique histoire d'un garçon découvert en 1800 dans les bois de l'Aveyron, nu et couvert de cicatrices. Âgé alors d'environ 12 ans, il aurait été abandonné vers l'âge de 4-5 ans et aurait tout oublié de sa prime enfance. Il fut pris en charge par le docteur Itard qui le baptisa Victor et le décrivit comme un enfant asocial. Victor ne parlera jamais, malgré tous les efforts déployés.

5 Un jeune chimpanzé observe sa mère attraper des termites à l'aide d'une baguette de bois. Les jeunes chimpanzés sont allaités et élevés par leur mère jusqu'à 4-5 ans, puis restent en famille jusque vers 10-11 ans. Ils apprennent ainsi, par imitation, de nombreuses techniques et acquièrent la capacité à communiquer avec leurs congénères. La communication est fondée sur un large registre verbal (cris d'alerte, grognements, etc.), des postures, des gestes et des expressions faciales.

Comportementet outil associé	Population		
	Boussu (Guinée)	Taï (Côte-d'Ivoire)	Gombe (Ouganda)
Manger du miel récupéré avec une baguette	–	+	+
Utiliser une boule de feuilles comme une éponge	+	+	+
Récupérer la moelle des os avec une baguette	nd	+	–
Casser des noix à l'aide d'une pierre ou d'un bout de bois et d'une enclume	+	+	nd
Écraser à l'aide d'un pilon	+	–	–
Utiliser un bâton en forme de crochet pour attraper quelque chose	+	–	–
Attraper des termites avec une brindille	–	nd	+

\+ le comportement est observé ; – le comportement n'est pas observé ; nd ressource non disponible

6 L'utilisation d'outils chez plusieurs populations de chimpanzés.
Les chimpanzés et l'Homme sont les seuls animaux qui utilisent une grande variété d'outils pour accomplir des tâches telles que boire, écraser, récupérer de la nourriture, etc. L'observation de populations de chimpanzés géographiquement isolées a permis de mettre en évidence des différences de comportement dans l'utilisation des outils.
Ces comportements sont transmis de génération en génération par imitation.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Montrez que le phénotype morphologique des grands primates se construit durant le développement pré et post-natal.
2 **DOC. 1 À 3.** Montrez que le phénotype morphologique des grands primates est le produit des interactions entre les gènes et l'environnement.
3 **DOC. 4 À 6.** Montrez que le phénotype comportemental des grands primates est le produit des interactions entre les gènes et l'environnement (aidez-vous du doc. 6 p. 77).
4 **DOC. 5 ET 6.** Donnez des arguments en faveur de l'existence d'une culture chez d'autres grands primates que l'Homme.
5 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les modalités de construction du phénotype chez les grands primates.

UNITÉ 5

La définition du genre *Homo*

On connaît de nombreux primates fossiles qui sont plus étroitement apparentés à l'Homme actuel – *Homo sapiens* – qu'aux chimpanzés, parmi lesquels certains sont attribués au genre *Homo*.

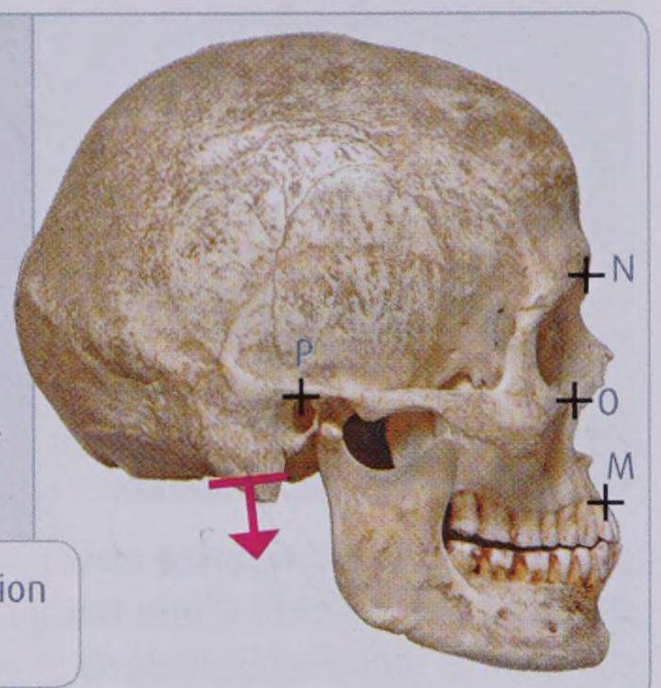
Quelles caractéristiques communes peut-on trouver aux représentants du genre *Homo* ?

L'étude de caractéristiques du crâne et de la mandibule

TP J'UTILISE MESURI

Homo sapiens actuel

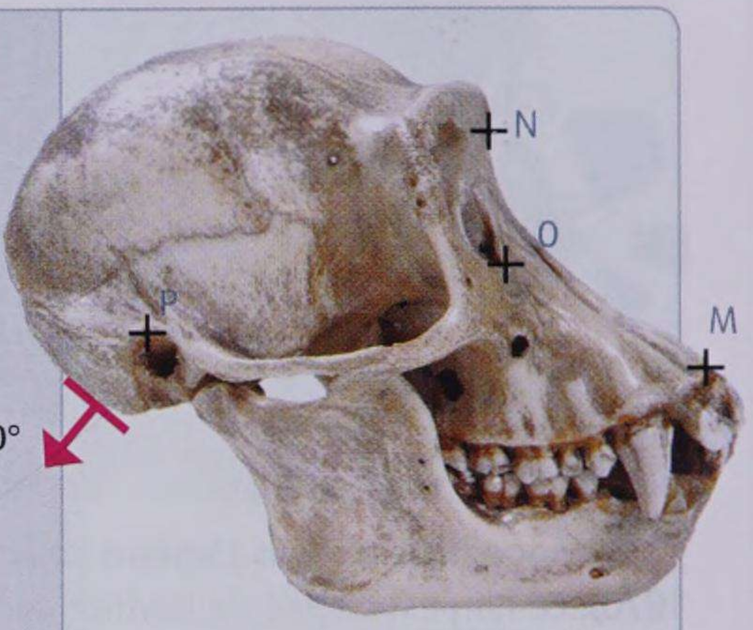
- Mandibule parabolique
- Volume cérébral : 1000 - 1850 cm^3
- Angle facial :
  - crâne photographié : 85°
  - intervalle de variation sur plusieurs specimens : 82 à 88°



Position et orientation du trou occipital

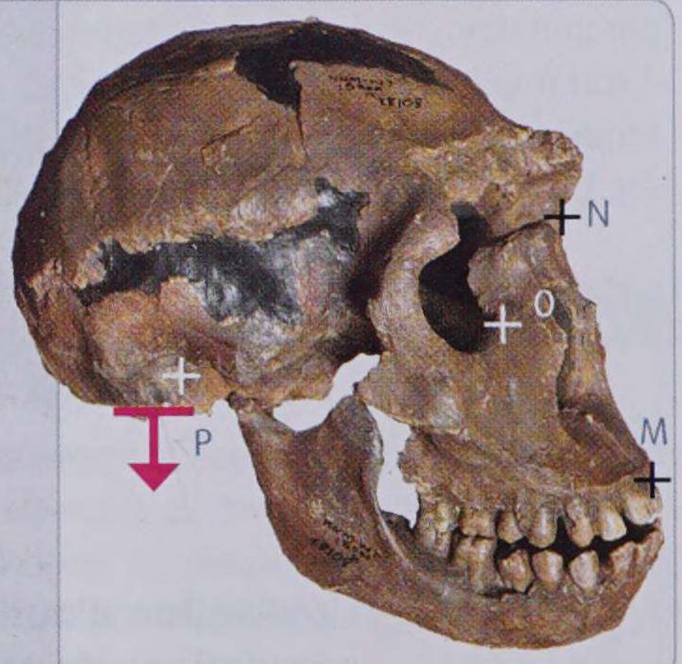
Pan troglodytes

- Mandibule en U
- Volume cérébral : 320 - 480 cm^3
- Angle facial :
  - crâne photographié : 54°
  - intervalle de variation sur plusieurs specimens : 50 à 60°



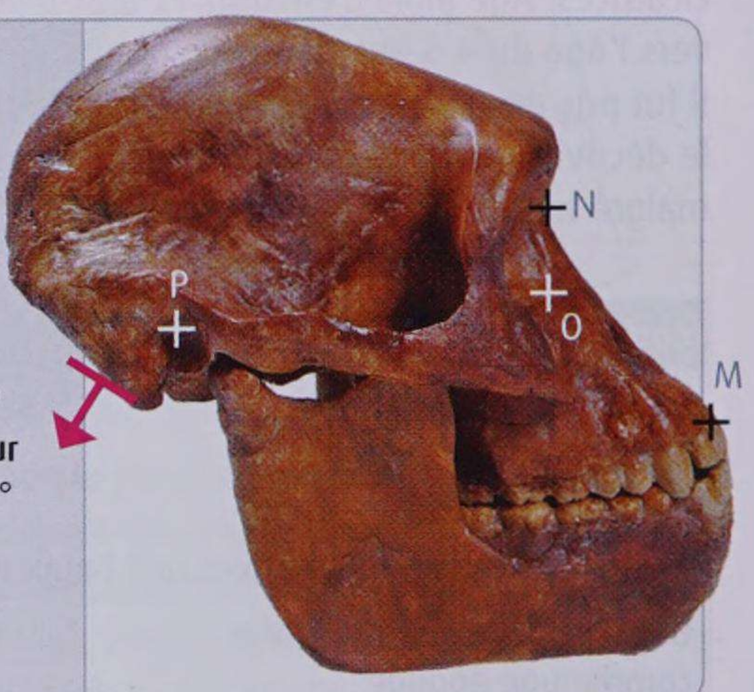
Homo ergaster

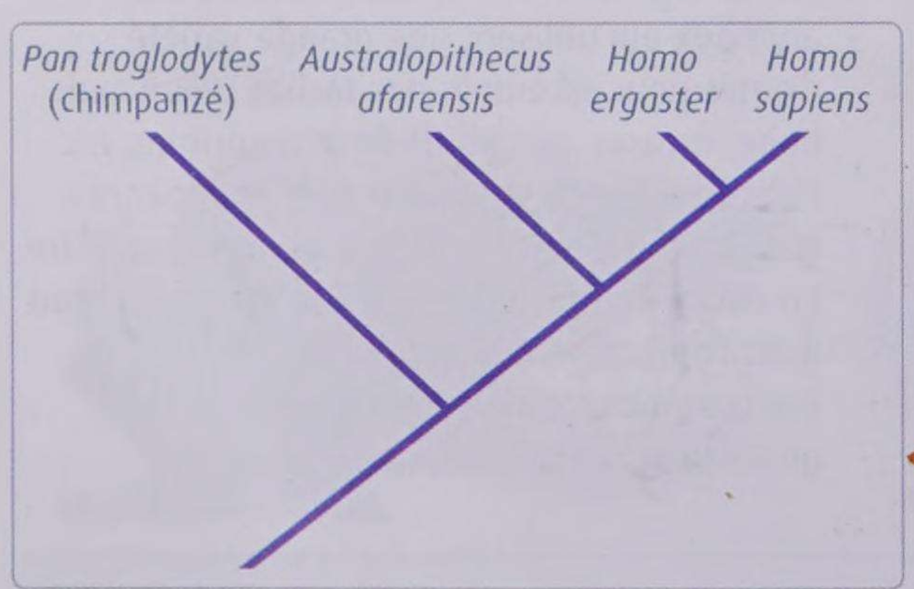
- Mandibule parabolique
- Volume cérébral : 700 - 850 cm^3
- Angle facial :
  - crâne photographié : 76°
  - intervalle de variation sur plusieurs fossiles : 75 à 81°



Australopithecus afarensis

- Mandibule en U
- Volume cérébral : 380 - 430 cm^3
- Angle facial :
  - crâne photographié : 56°
  - intervalle de variation sur plusieurs fossiles : 56 à 75°





1 Vue de profil du crâne de 4 primates : *Homo sapiens* (actuel), *Pan troglodytes* (chimpanzé, actuel), *Australopithecus afarensis* (3,5 Ma) et *Homo ergaster* (1,5 Ma). L'angle facial est l'angle formé par les droites passant par les points MN et PO. La valeur de cet angle est inversement proportionnelle à l'allongement de la face (prognathisme). Le trou occipital est la zone d'insertion du crâne sur la colonne vertébrale. La bipédie est associée à un trou occipital en position centrale et dans un plan horizontal.

2 Arbre de parenté entre les primates du doc. 1. Les australopithèques forment un groupe de grands primates fossiles ayant vécu entre – 4,5 et – 1,98 Ma en Afrique de l'Est et du Sud.

ACTIVITÉS

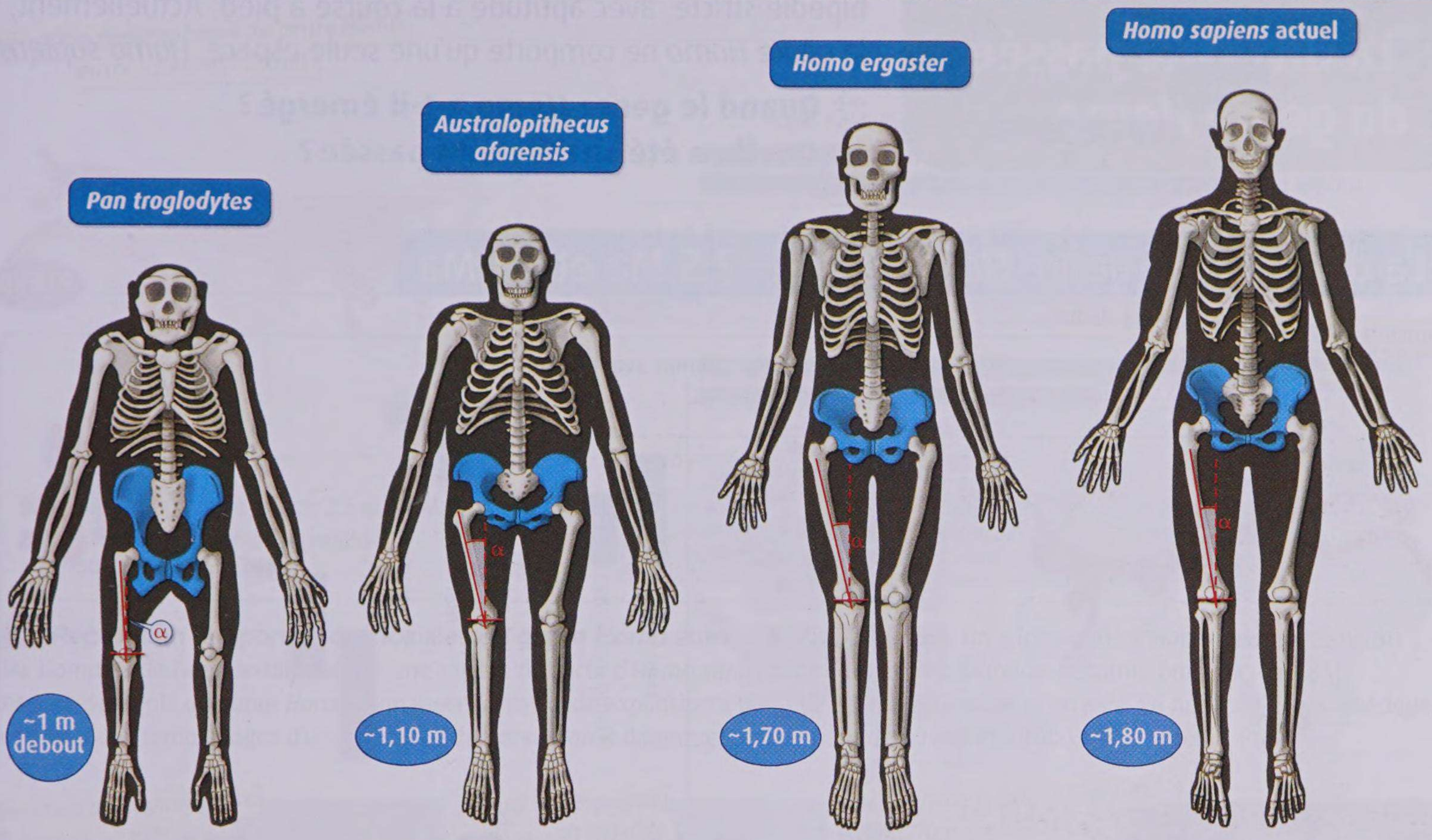
1 **DOC. 1.** Déterminez les caractéristiques du crâne et des mandibules associées au genre *Homo*.

2 **DOC. 1 ET 3.** Déterminez quelques différences et points communs concernant le trou occipital, le bassin, le fémur et les proportions corporelles chez les 4 primates. Formulez alors une hypothèse quant au type de bipédie pratiqué par *Homo ergaster*.

3 **DOC. 4.** Précisez vos conclusions quant à la bipédie d'*Homo ergaster*.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques associées au genre *Homo* que l'étude des quatre primates présentés vous a permis de mettre en évidence.

L'étude de caractéristiques liées à la locomotion



3 Squelette et proportions corporelles des primates du doc. 1. Le chimpanzé pratique occasionnellement la bipédie sur de courtes distances. Ses membres supérieurs (mains non comprises) sont longs par rapport aux membres inférieurs (pieds non compris). *Homo sapiens* est, lui, un bipède permanent strict, avec des membres inférieurs plus longs que les membres supérieurs et des caractéristiques anatomiques particulières. L'analyse du squelette d'*Autralopithecus afarensis* suggère que celui-ci pratiquait une autre forme de bipédie : une bipédie arboricole. Il était en position érigée, mais avait une aptitude au grimper bien plus forte que celle de l'Homme actuel. Ses membres inférieurs étaient aussi longs que ses membres supérieurs.

Interview de **Sandrine Prat**, chercheuse au CNRS.

Les os du squelette post-crânien, en particulier ceux des mains et des pieds, sont rarement conservés. Encore plus exceptionnelles sont les empreintes de pas fossilisées. Lorsqu'il dispose de ces éléments, le paléoanthropologue peut préciser, par exemple, la morphologie du pied (notamment la présence d'une voûte plantaire) d'un individu fossile et conclure quant à son type de locomotion. Toutefois, cela ne suffit pas pour déterminer si ce dernier était capable de marcher et de courir sur de longues distances. Pour cela, les chercheurs font des comparaisons entre le fossile et les grands primates actuels, au plan anatomique et biomécanique. Ils tentent également de modéliser les mouvements chez l'individu fossile, ainsi que leur coût énergétique. De la sorte, ils peuvent parvenir à déterminer si les caractéristiques associées à l'aptitude à l'endurance existent sur le fossile étudié. Ce type d'études menées sur des fossiles d'*Homo ergaster* permettent de conclure que ces derniers étaient, comme *Homo sapiens*, des coureurs endurants.

Empreinte de pied d'*Homo ergaster* âgée de 1,5 Ma. L'étude d'autres empreintes découvertes à proximité a permis de conclure que le pied d'*Homo ergaster* était pourvu d'une voûte plantaire.

4 Comment déterminer l'aptitude à la course d'un individu fossile ?

UNITÉ 6

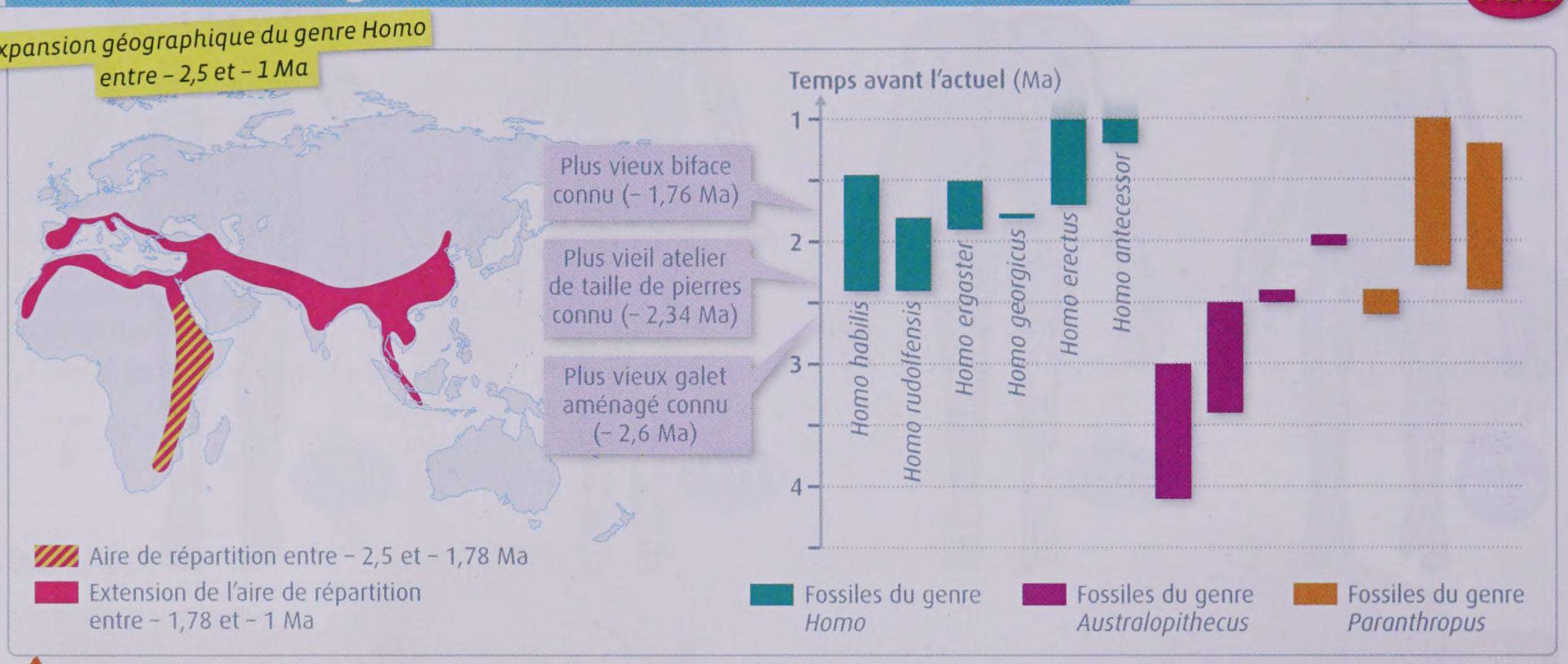
La diversité passée du genre *Homo*

Le genre *Homo* se caractérise, notamment, par un important volume crânien associé à une réduction de la face et par une bipédie stricte, avec aptitude à la course à pied. Actuellement, le genre *Homo* ne comporte qu'une seule espèce, *Homo sapiens*.

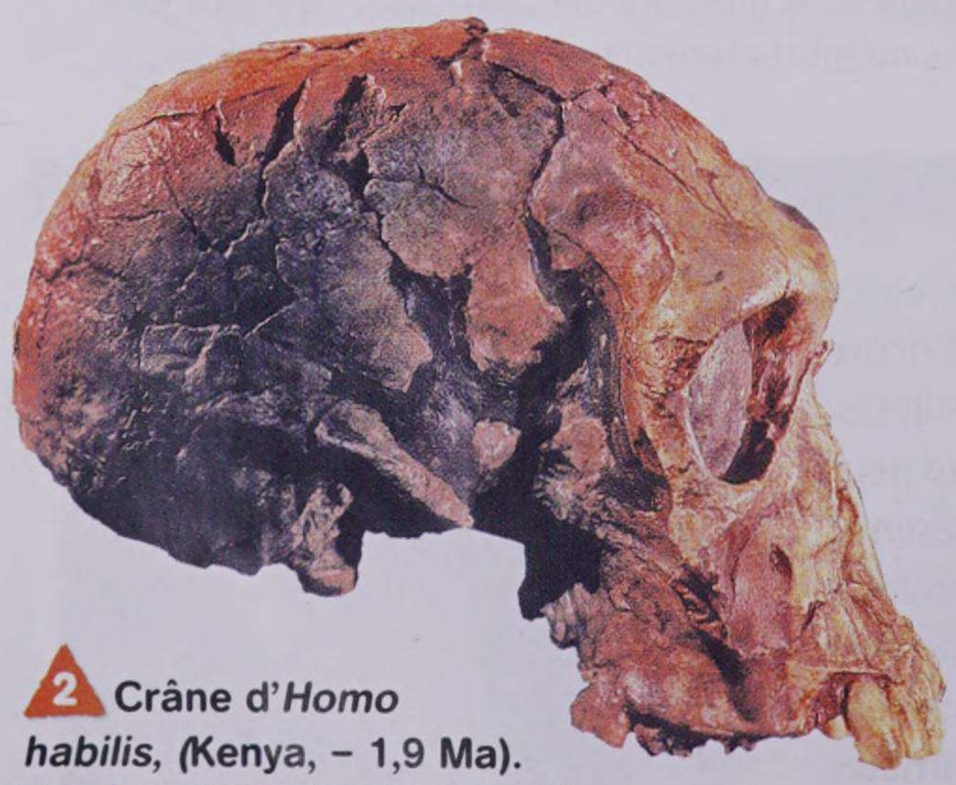
Quand le genre *Homo* a-t-il émergé ? Quelle a été sa diversité passée ?

La diversité du genre *Homo* entre – 2,5 Ma et – 1 Ma

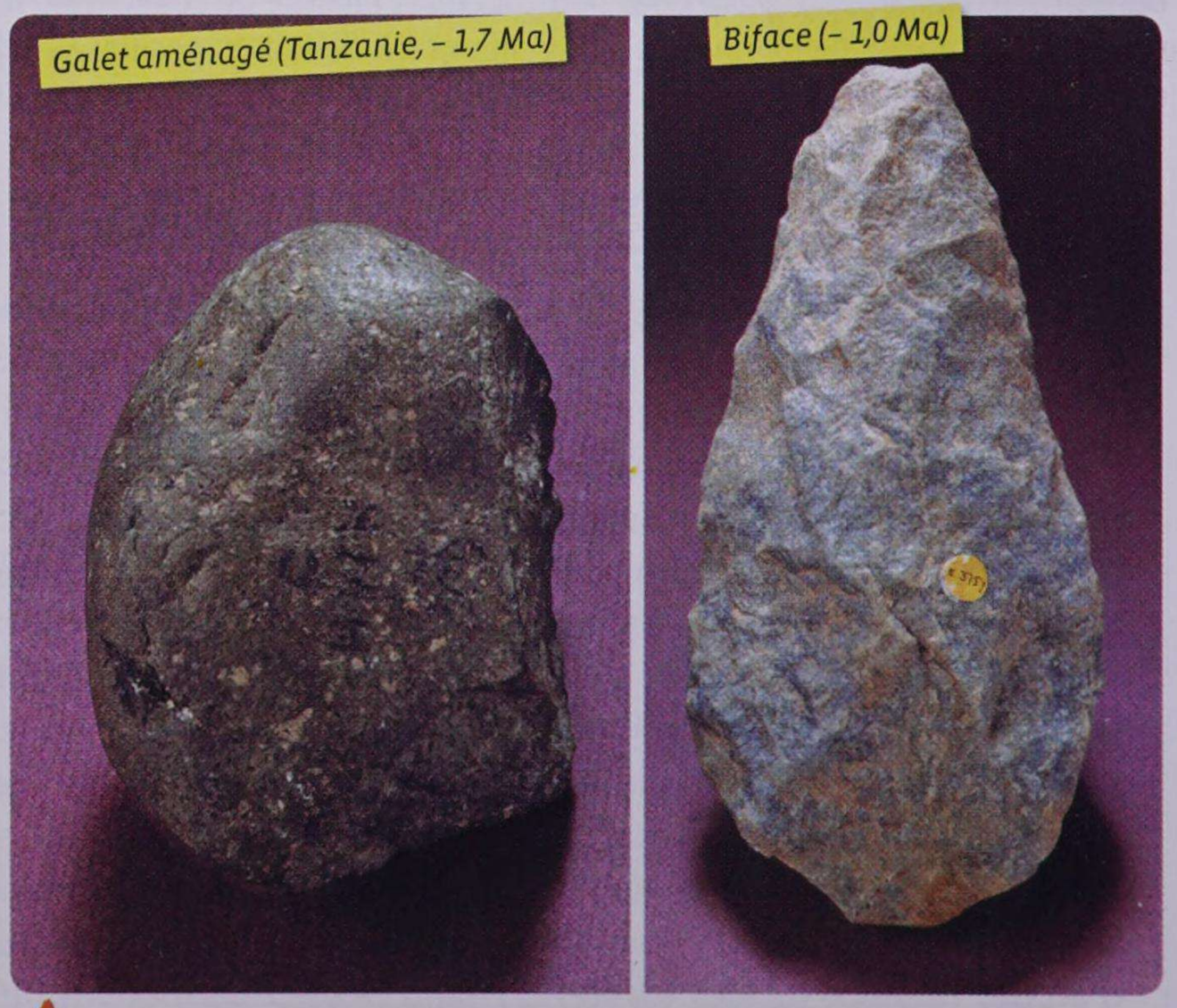
PISTE



1 Répartition temporelle et géographique de quelques fossiles de primates. On a représenté la répartition temporelle entre – 4 et – 1 Ma de quelques fossiles plus proches parents de l'Homme actuel que des chimpanzés appartenant à trois genres : *Homo*, *Australopithecus* (australopithèques) et *Paranthropus* (paranthropes). *Homo georgicus* (– 1,78 Ma) est le plus ancien fossile du genre *Homo* découvert hors d'Afrique. Entre – 1,78 et – 1 Ma, l'expansion du genre *Homo* en Eurasie est essentiellement attestée par la découverte d'outils en pierre taillée (assez peu de fossiles du genre *Homo* ont été découverts). D'après S. Prat.



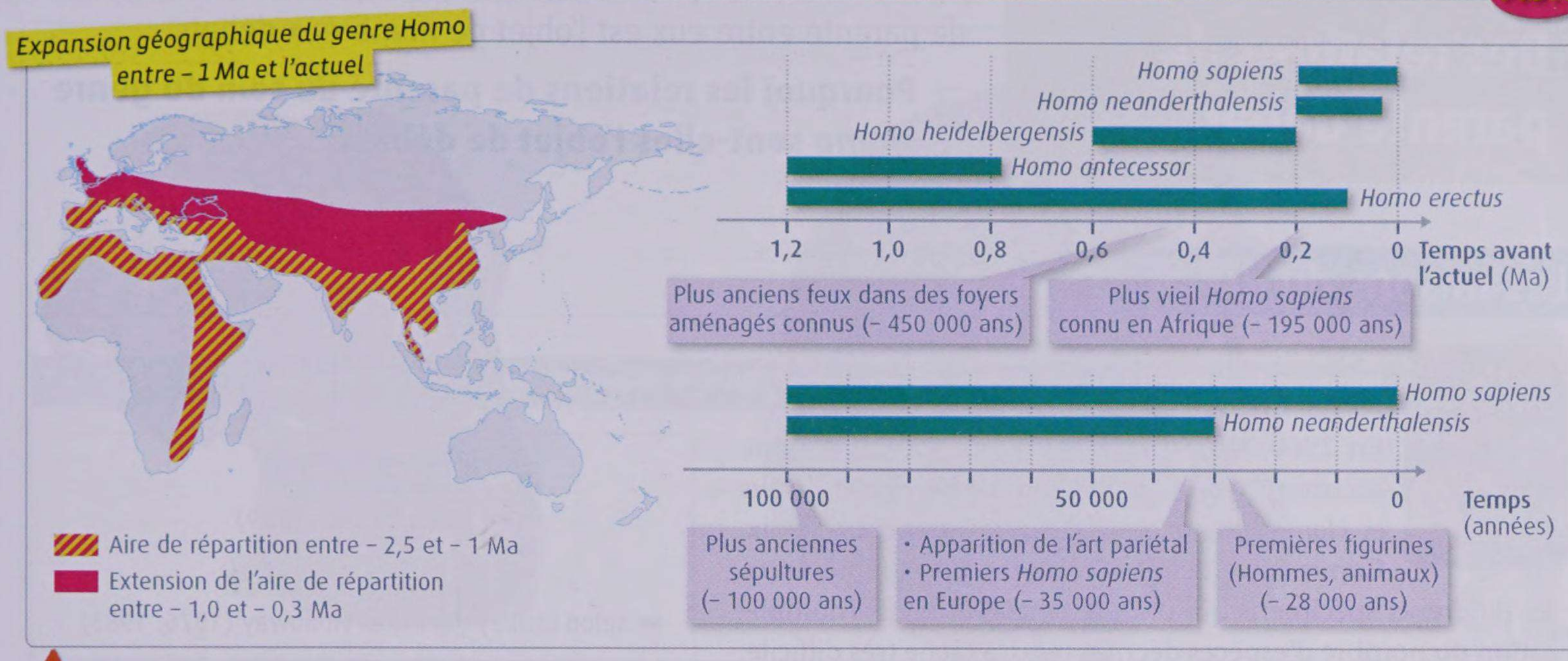
2 Crâne d'*Homo habilis*, (Kenya, – 1,9 Ma). Pour la majorité des chercheurs, les *Homo habilis* sont, par la morphologie de leur crâne (faible prognathisme), les plus vieux représentants connus du genre *Homo*. Pour d'autres, ce sont des australopithèques, en raison notamment de leurs proportions corporelles, proches de celles de bipèdes arboricoles. Celles-ci sont toutefois difficiles à reconstituer car on dispose de peu d'éléments du squelette post-crânien.



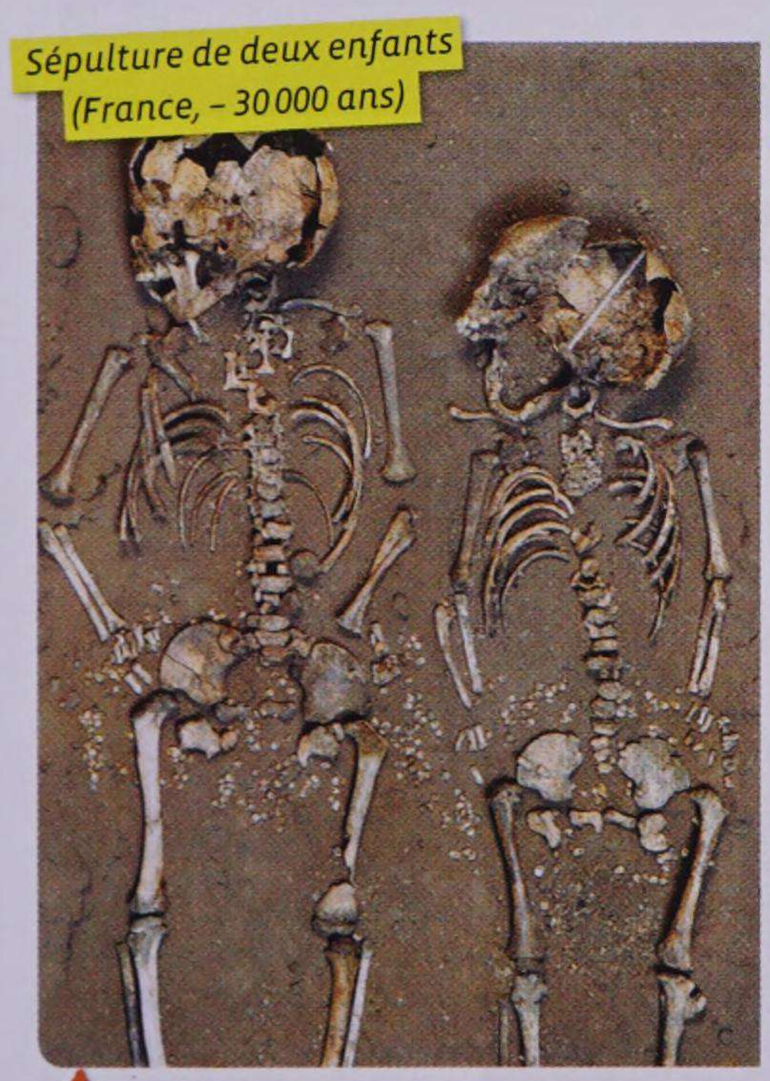
3 Galet aménagé et biface. Il s'agit d'outils tranchants en pierre longs de quelques cm. Ils ont été trouvés dans des sites contemporains à la fois des paranthropes et de représentants du genre *Homo*.

La diversité du genre *Homo* entre – 1 Ma et l'actuel

PISTE



4 Répartition temporelle des fossiles du genre *Homo* entre – 1 Ma et l'actuel. On a ici considéré *Homo neanderthalensis* (les Hommes de Néandertal) comme une espèce distincte d'*Homo sapiens*. La question est toutefois débattue (voir doc. 3 p. 85). Les représentants du genre *Homo* connaissent une rapide expansion à partir de – 1 Ma en Europe et en Asie. En Australie et en Amérique, les plus vieux témoignages d'une présence du genre *Homo* datent respectivement de 50 000 et 19 000 ans. D'après S. Prat.


Sépulture de deux enfants (France, – 30 000 ans)

Vénus de Lespugue (France, – 23 000 ans)

Peinture de la grotte Chauvet (France, – 30 000 ans)

5 Quelques témoignages de l'activité culturelle de représentants du genre *Homo*. On a mis au jour des sépultures et des éléments de parure (coquillages et dents percées portées en pendentifs) tant chez les Hommes de Néandertal que chez les *Homo sapiens*. En revanche, les représentations abstraites ou figuratives (figurines animales et humaines, objets décorés, art pariétal) ne sont connues que chez les *Homo sapiens*. À partir de – 28 000 ans, on observe une forte expansion de ces représentations symboliques en Europe.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 4.** Résumez les étapes de l'expansion géographique du genre *Homo* et montrez que plusieurs espèces ont coexisté.
2. **DOC. 2.** Indiquez quels types de difficultés on peut rencontrer pour dater l'émergence du genre *Homo*.
3. **DOC. 3 ET UNITÉ 4.** Indiquez si la production d'outils et les pratiques culturelles sont exclusives au genre *Homo*.
4. **DOC. 5.** Indiquez s'il existe une (des) spécificité(s) de l'espèce *Homo sapiens* du point de vue des pratiques culturelles.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez sous la forme d'un texte quelques événements ayant marqué l'histoire du genre *Homo*.

UNITÉ 7

Des relations de parenté débattues

L'étude des représentants fossiles du genre *Homo* est un domaine scientifiquement très actif. La question des relations de parenté entre eux est l'objet de nombreux débats.

Pourquoi les relations de parenté au sein du genre *Homo* sont-elles l'objet de débats ?

Les raisons du débat

Interview de **Véronique Barriel**, chercheuse en paléoanthropologie (Museum national d'Histoire naturelle)

En 1960, les espèces du genre *Homo* étaient au nombre de trois : *Homo habilis*, *Homo erectus* et *Homo sapiens*. En 2012, elles sont plus de dix. Comment établir les relations de parenté entre les différents spécimens qui ont été découverts ? La multiplication du nombre d'espèces décrites rend la tâche très difficile. Déjà, l'attribution taxinomique (c'est-à-dire le rattachement à telle ou telle espèce) d'un nombre non négligeable de fossiles est problématique. En effet, il n'existe quasiment pas de caractères morphologiques non ambigus qui permettraient de rattacher un spécimen fossile à une espèce donnée. Les différences morphologiques entre certains fossiles sont souvent du même ordre que les variations observées au sein d'une population d'une même espèce. Et l'ambiguïté va au-delà du genre *Homo* : on connaît par exemple de nombreux fossiles dont la mandibule est délicate à classer comme étant soit parabolique (à l'image de celle des *Homo ergaster*), soit « en U » (comme celle du fossile d'*Australopithecus afarensis* p. 80)...

En outre, la décision de rattacher certains fossiles à une nouvelle espèce du genre *Homo* est parfois liée au caractère exceptionnel d'une découverte. Ainsi, le premier fossile du genre *Homo* mis au jour dans la péninsule ibérique (âgé de 1,1 à 1,2 Ma) fut assigné à une nouvelle espèce : *Homo antecessor*. Il est toutefois bien difficile d'établir avec précision ce qui distingue cette espèce d'autres espèces contemporaines du genre *Homo*.

Conclusion : on ne peut pas, aujourd'hui, reconstituer les relations de parenté au sein du genre *Homo*. Ce que l'on sait en revanche, c'est qu'aucun de ces fossiles ne peut être considéré comme un ancêtre d'une espèce actuelle, Homme, chimpanzé ou autre.

Homo ergaster
➥ selon Groves (1989)

***Australopithecus* sp.**
➥ selon Leakey (1976) et Holloway (1976, 1983)

Homo erectus
➥ selon Howell (1978) et Wolpoff (1978, 1984)

Australopithecus boisei
➥ selon Tobias (1980)

***Homo habilis* « au sens large »**
➥ selon Kimbel (1984) et White (1981)

Australopithecus africanus
➥ Selon Falk (1986)

Homo ergaster
➥ selon Stringer (1986)

***Homo* sp.**
➥ selon Chamberlain (1987)

Homo habilis
➥ selon Wood (1991, 1992)

***Homo* d'une nouvelle espèce**
➥ selon Rightmire (1993)

Attribution taxinomique du spécimen KNM-ER1805 selon différents auteurs. Ce fossile découvert en 1973 au Kenya correspond à trois fragments crâniens d'un grand primate âgé de 1,9 Ma (« sp. » : espèce indéterminée au sein du genre). D'après S. Prat (2002).

1 Pourquoi la phylogénie du genre *Homo* est-elle non résolue ?

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Indiquez la principale difficulté concernant la détermination des relations de parenté au sein du genre *Homo*.

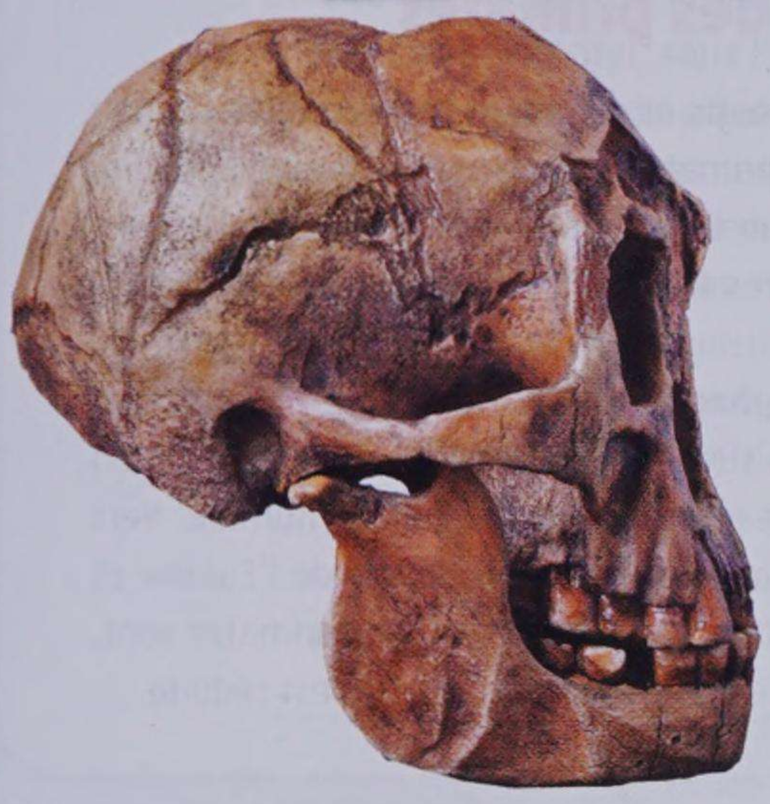
2 **DOC. 2.** Expliquez en quoi le cas de l'Homme de Flores est problématique.

3 **DOC. 3.** Indiquez si l'on peut aujourd'hui considérer *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* comme deux espèces distinctes ou comme deux sous-espèces.

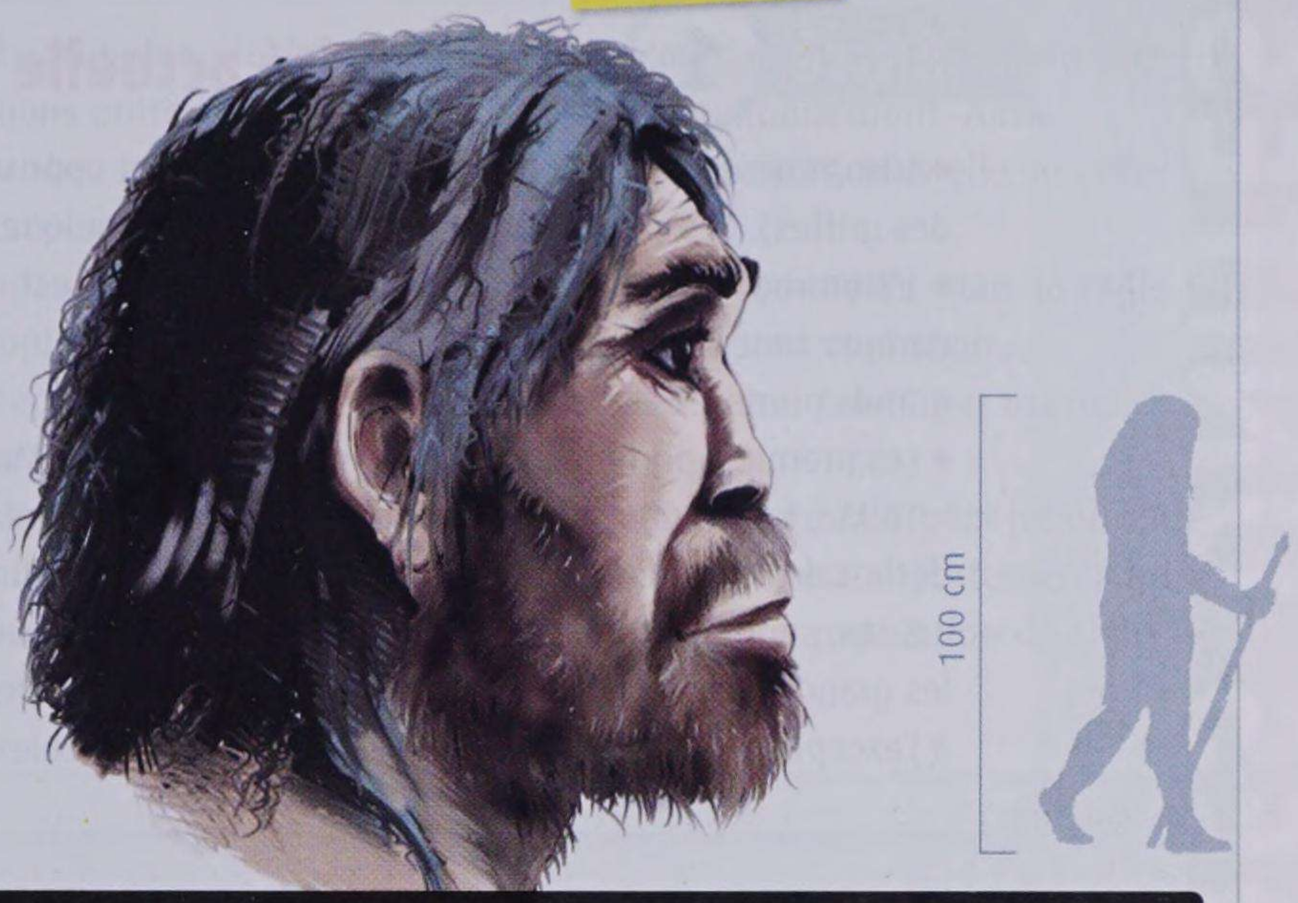
4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez sous la forme d'un texte quelques débats qui animent la communauté scientifique concernant les relations de parenté au sein du genre *Homo*.

Deux exemples de débats

Crâne de l'Homme de Florès (– 18 000 ans)



Reconstitution



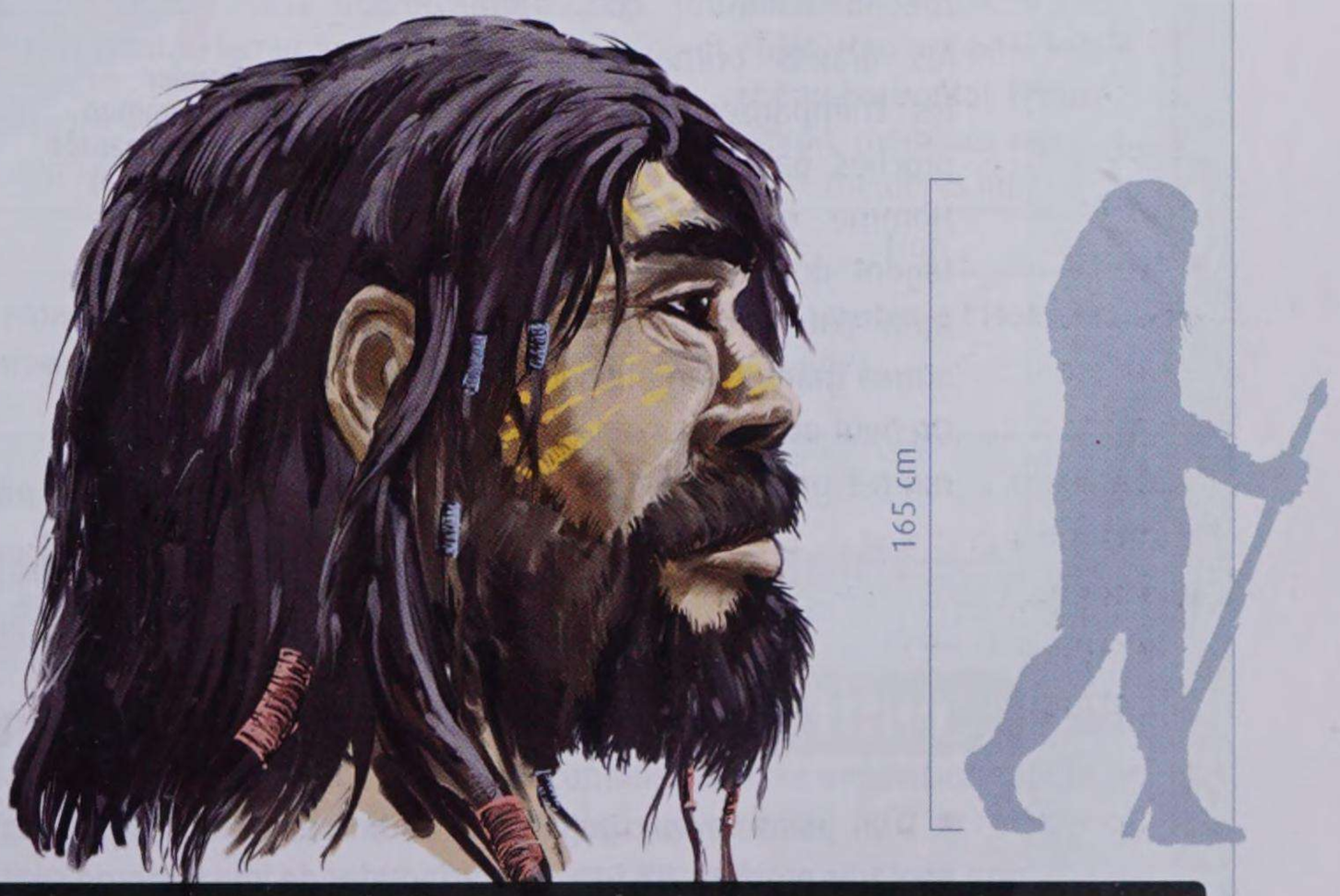
2003. Des restes fossiles d'un représentant du genre *Homo* haut de 1 mètre sont découverts dans l'île de Flores (Indonésie). Datés de 18 000 ans, ils sont attribués à une nouvelle espèce : *Homo floresiensis*. Soulignant la ressemblance entre le crâne de ce fossile et celui d'*Homo erectus*, les découvreurs concluent qu'*Homo floresiensis* est une forme d'*Homo erectus* ayant évolué vers un nanisme suite à un long isolement insulaire.

2007. Une étude conclut que, par l'anatomie de son poignet, *Homo floresiensis* se rapproche plus d'*Homo habilis* que d'*Homo erectus*.
2011. Une nouvelle étude compare le crâne d'*Homo floresiensis* avec celui de 21 enfants actuels souffrant de microcéphalie. Sa conclusion : la petitesse du squelette et du crâne d'*Homo floresiensis* est la marque d'un désordre pathologique. « L'homme de Flores » serait ainsi un *Homo sapiens* atteint de nanisme ou de microcéphalie.

2 Qui est l'Homme de Flores ?

Crâne de l'Homme de la Ferrassie (– 35 000 ans)

Reconstitution



1856. Découverte de traces fossiles attribuées à une nouvelle espèce : *Homo neanderthalensis*.
Durant tout le XXe siècle, la question de savoir si *Homo sapiens* et les Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) sont deux espèces distinctes ou deux populations distinctes morphologiquement, mais pouvant être interfécondes (sous-espèces) fait débat. Celui-ci est nourri par l'analyse de caractères morphologiques et de productions culturelles, et par le fait qu'*Homo sapiens* et Néandertaliens ont pu cohabiter en Europe entre – 35 000 et – 30 000 ans.

1997. 379 nucléotides de l'ADN mitochondrial d'un Néandertalien sont séquencés et comparés avec la séquence homologue chez 2051 Hommes actuels. Il y a 26 différences entre le Néandertalien et les Hommes actuels, contre 8 en moyenne entre des Hommes actuels de populations différentes.
2010. Reconstitution de la séquence du génome complet d'un Néandertalien à partir de l'ADN de quatre individus. Des analyses génétiques concluent à la présence de séquences d'origine néandertaliennes dans le génome de certaines populations d'Hommes actuels.

3 Qui est l'Homme de Néandertal ?

CHAPITRE 4 Un regard sur l'évolution de l'Homme

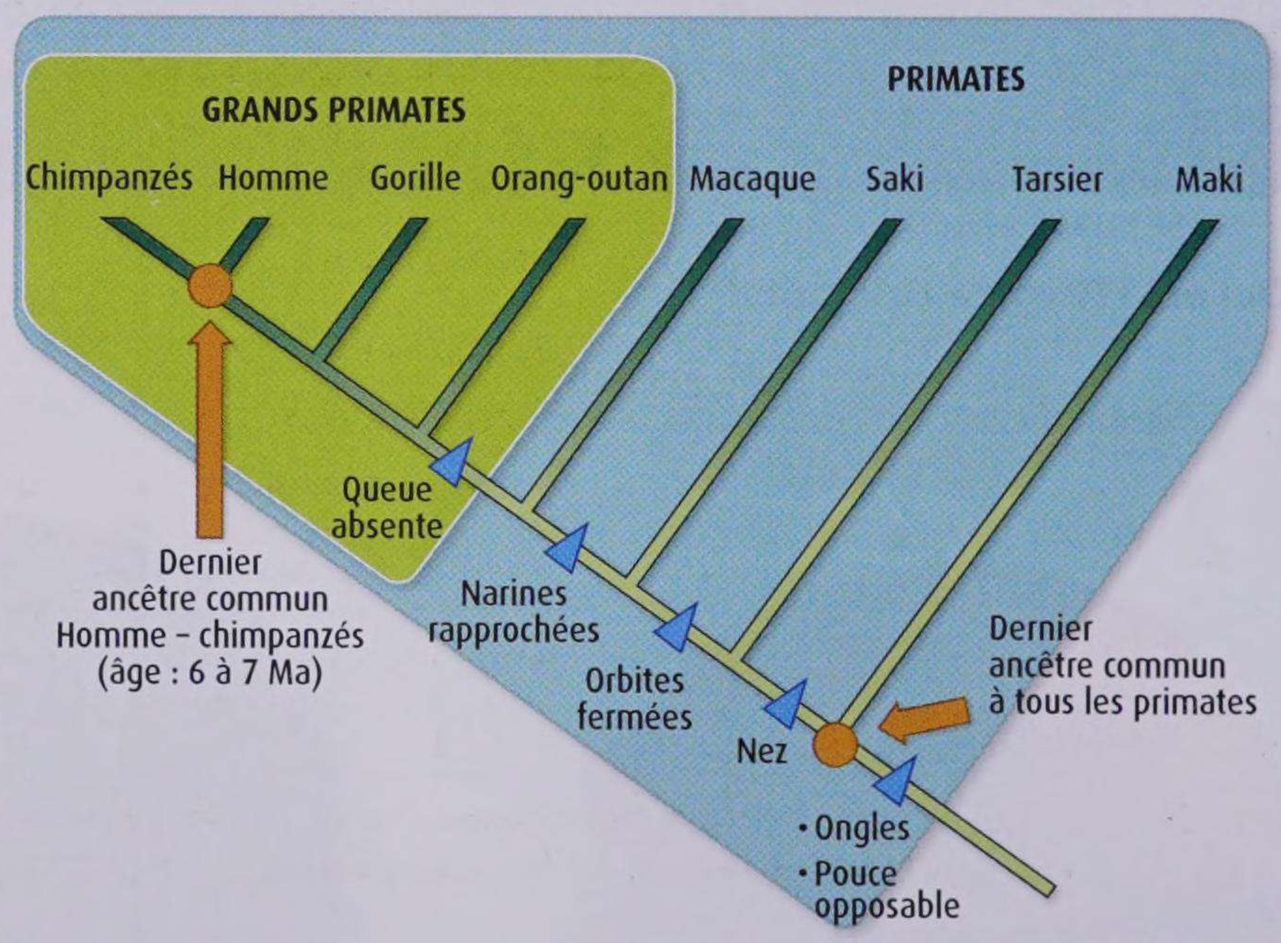
BILAN DES UNITÉS

UNITÉ 1 La diversité actuelle et passée des primates

- L'Homme est un mammifère dont le pouce est opposable aux autres doigts et qui possède des ongles (et non des griffes). Ces caractères font de lui l'une des quelque 190 espèces de primates que compte la nature actuelle.
- L'Homme est un primate dont l'appendice nasal est un nez (et non une truffe), les orbites sont ouvertes, les narines sont rapprochées et qui ne possède pas de queue : ces caractères font de lui l'une des 19 espèces de grands primates actuels.
- Les premiers primates fossiles datent de – 65 à – 55 Ma et les premiers grands primates fossiles de – 20 Ma. Vers – 16 Ma, les grands primates connaissent une forte diversification dans le sud de l'Eurasie, alors que la formation de la calotte polaire antarctique provoque une migration vers le nord des zones à climat tropical humide. Vers – 8 Ma, suite à la formation de la calotte polaire arctique, le climat redevient tempéré dans le sud de l'Eurasie et les grands primates disparaissent de cette région, sauf en Asie du sud-est. Aujourd'hui, les grands primates sont, à l'exception de l'Homme, inféodés aux forêts tropicales de l'Afrique et de l'Eurasie. Leur diversité est réduite.

UNITÉ 2 La place de l'Homme parmi les grands primates

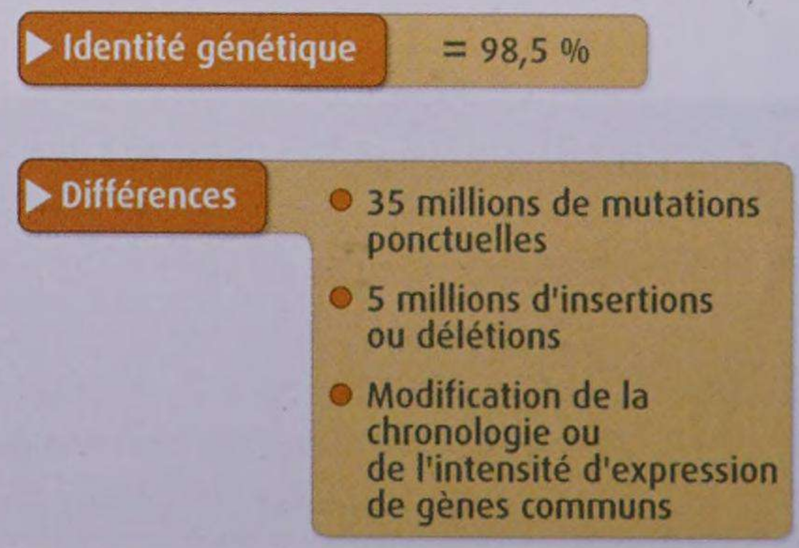
- À l'exception de l'Homme, les grands primates actuels sont tous en danger d'extinction du fait de la réduction des forêts tropicales et équatoriales qu'ils peuplent.
- L'étude de la séquence de gènes et de protéines permet de montrer que, parmi les grands primates actuels, les chimpanzés sont les plus proches parents de l'Homme. Homme et chimpanzés partagent donc un ancêtre commun plus récent qu'avec les autres grands primates actuels. On peut estimer son âge à environ 6-7 millions d'années.



Arbre de parenté des primates.

UNITÉ 3 La comparaison génétique de l'Homme et des chimpanzés

- D'un point de vue génétique, l'Homme et les chimpanzés sont très proches : 98,5 % des nucléotides de leur génome sont identiques et leurs caryotypes ne diffèrent que par quelques réarrangements chromosomiques (qui ont modifié la position de certains gènes) et par la fusion de deux chromosomes.
- C'est surtout le niveau et la chronologie d'expression de certains gènes qui distinguent l'Homme des chimpanzés. L'interprétation de ces différences génétiques est très délicate. Il en est de même pour l'interprétation des conséquences de mutations qui modifient la séquences de certaines protéines entre Homme et chimpanzés.



Points communs et différences génétiques entre Homme et chimpanzés.

UNITÉ 4 La construction du phénotype des grands primates

• Le phénotype de l'Homme et des grands primates proches se construit au cours du développement prénatal et post-natal, sous l'effet des interactions entre l'expression des gènes et l'environnement. Ainsi :
– la morphologie du crâne est assez proche chez le fœtus de l'Homme et des chimpanzés, puis elle se différencie nettement chez les deux espèces au cours du développement post-natal ;
– la morphologie crânienne est contrôlée par l'expression de certains gènes chez l'embryon, mais la taille d'individus génétiquement proches dépend de facteurs liés à l'environnement, comme la nutrition ;
– Chez l'Homme, l'acquisition du langage dépend à la fois de facteurs génétiques (gène *FoxP2* par exemple) et des interactions avec les autres individus ;
– chez les chimpanzés, des comportements associés à l'utilisation d'outils sont transmis de génération en génération par imitation et apprentissage. D'une population de chimpanzés à l'autre, ces comportements ne sont pas les mêmes. On peut les assimiler à des pratiques culturelles propres à chaque population de chimpanzés. Les pratiques culturelles ne sont donc pas exclusivement associées à l'Homme.

UNITÉ 5 La définition du genre *Homo*

• Le genre *Homo* regroupe l'Homme et plusieurs fossiles plus proches parents de l'Homme actuel que des chimpanzés.
• L'appartenance au genre *Homo* est définie par plusieurs critères liés notamment à la morphologie de la face, à la locomotion bipède et à l'existence d'un dimorphisme sexuel peu marqué au niveau du squelette.

<table>
<tr><th></th><th>Homo</th><th>Australopithecus</th><th>Pan</th></tr>
<tr><td>Face</td><td>Réduite et plate</td><td colspan="2">Mâchoires développées vers l'avant,
à l'origine d'un prognatisme marqué</td></tr>
<tr><td>Mandibule</td><td>Parabolique</td><td colspan="2">En U</td></tr>
<tr><td>Volume cérébral</td><td>Supérieur à 600 cm^3</td><td colspan="2">Inférieur à 600 cm^3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Bipédie</td><td colspan="2">Permanente (bassin court et évasé, trou occipital avancé et horizontal, fémur incliné)</td><td rowspan="2">Occasionnelle (bassin haut et étroit, trou ocippital reculé et non horizontal, fémur droit, membres sup.
> membres inf.)</td></tr>
<tr><td>Stricte (membres inf. > membres sup.)</td><td>Arboricole (membres sup. ≈ membres inf.)</td></tr>
<tr><td>Aptitude à la course</td><td>Oui</td><td>Non</td><td>Non</td></tr>
</table>

Quelques caractéristiques des genres *Homo*, *Australopithecus* (autres fossiles plus apparentés à l'Homme actuel qu'aux chimpanzés) et *Pan* (chimpanzés). (> : plus long que ; ≈ : de même longueur que)

UNITÉS 6 7 Diversité passée et relations de parenté au sein du genre *Homo*

• Les plus vieux fossiles du genre *Homo* sont âgés de 2,5 Ma en Afrique et de 1,78 Ma en Eurasie. À partir de – 1,78 Ma, puis surtout de – 1 Ma, les représentants du genre *Homo* connaissent une expansion rapide en Europe et en Asie. À une époque donnée, plusieurs espèces d'*Homo* ont pu coexister.
• Les plus vieux fossiles connus d'*Homo sapiens* sont âgés de 195 000 ans en Afrique et de 35 000 ans en Europe. Jusqu'à – 30 000 ans, les *Homo sapiens* coexistent avec d'autres espèces du genre *Homo*.
• La production d'outils variés et les pratiques culturelles sont associées au genre *Homo*, mais de façon non exclusive : on les retrouve chez les chimpanzés et chez d'autres primates fossiles plus apparentés à l'Homme actuel qu'aux chimpanzés (les paranthropes). Les représentations artistiques abstraites ou figuratives, qui émergent vers – 35 000 ans, sont, elles, l'apanage de l'espèce *Homo sapiens*.
• On ne peut, aujourd'hui, reconstituer les relations de parenté entre la dizaine d'espèces que compte le genre *Homo*. L'une des principales raison en est que le rattachement de nombreux fossiles à une espèce donnée (voire à un genre donné) est problématique, faute de caractères morphologiques non ambigus et de fossiles suffisamment complets.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 4

Un regard sur l'évolution de l'Homme

L'essentiel par le texte

La place de l'Homme parmi les primates

- L'histoire évolutive de l'Homme s'inscrit dans celle des **primates**, dont les premiers représentants fossiles sont âgés de 65 à 50 Ma. L'Homme appartient au groupe des **grands primates**, dont les premiers représentants émergent dans le registre fossile vers – 20 Ma. La diversité des grands primates est aujourd'hui réduite.
- Parmi les grands primates actuels, les chimpanzés sont les plus proches parents de l'Homme. Homme et chimpanzés partagent ainsi un **ancêtre commun** récent. Aucun fossile ne peut être considéré comme correspondant à cet ancêtre commun.
- Le génome des chimpanzés et celui de l'Homme sont très proches. Homme et chimpanzés se distinguent surtout par des différences de niveau et de chronologie d'expression de certains gènes.
- Chez l'Homme et les autres grands primates, la construction du phénotype est réalisée lors du développement pré-natal et post-natal, sous le contrôle de l'expression des gènes et des interactions avec l'environnement (notamment des échanges avec les autres individus).

La définition et l'histoire du genre *Homo*

- L'Homme (*Homo sapiens*) appartient au genre *Homo*, défini notamment par une face réduite, une mandibule parabolique, un dimorphisme sexuel peu marqué sur le squelette et une bipédie stricte, avec trou occipital en position avancée et aptitude à la course. L'existence de pratiques culturelles et l'utilisation d'une grande variété d'outils sont associées au genre *Homo*, mais de façon non exclusive (on les retrouve par exemple chez les chimpanzés).
- Les premiers représentants fossiles du genre *Homo* ont été découverts en Afrique. Ils sont âgés de 2,5 Ma. À partir de – 1,78 Ma, le genre *Homo* connait une forte expansion en Europe et en Asie.
- Plusieurs espèces appartenant au genre *Homo* ont pu se cotoyer dans le temps et dans l'espace, mais, depuis 30 000 ans, le genre ne compte plus qu'une seule espèce : *Homo sapiens* (plus vieux fossiles connus âgés de 195 000 ans).
- Les scientifiques ne parviennent pas, aujourd'hui, à reconstituer les relations de parenté entre les différentes espèces du genre *Homo*.

Les capacités et attitudes

- Positionner des espèces de primates dans un arbre phylogénétique **(unités 1 et 2)**
- Comparer le génotype de différents primates **(unité 3)**
- Recenser, extraire et exploiter des informations pour comprendre la construction du phénotype chez les grands primates **(unité 4)**
- Utiliser un logiciel et mettre en relation des informations pour déterminer les caractères associés au genre *Homo* **(unité 5)**
- Recenser, extraire et exploiter des informations pour comprendre l'histoire du genre *Homo* et les difficultés que pose son étude **(unités 6 et 7)**

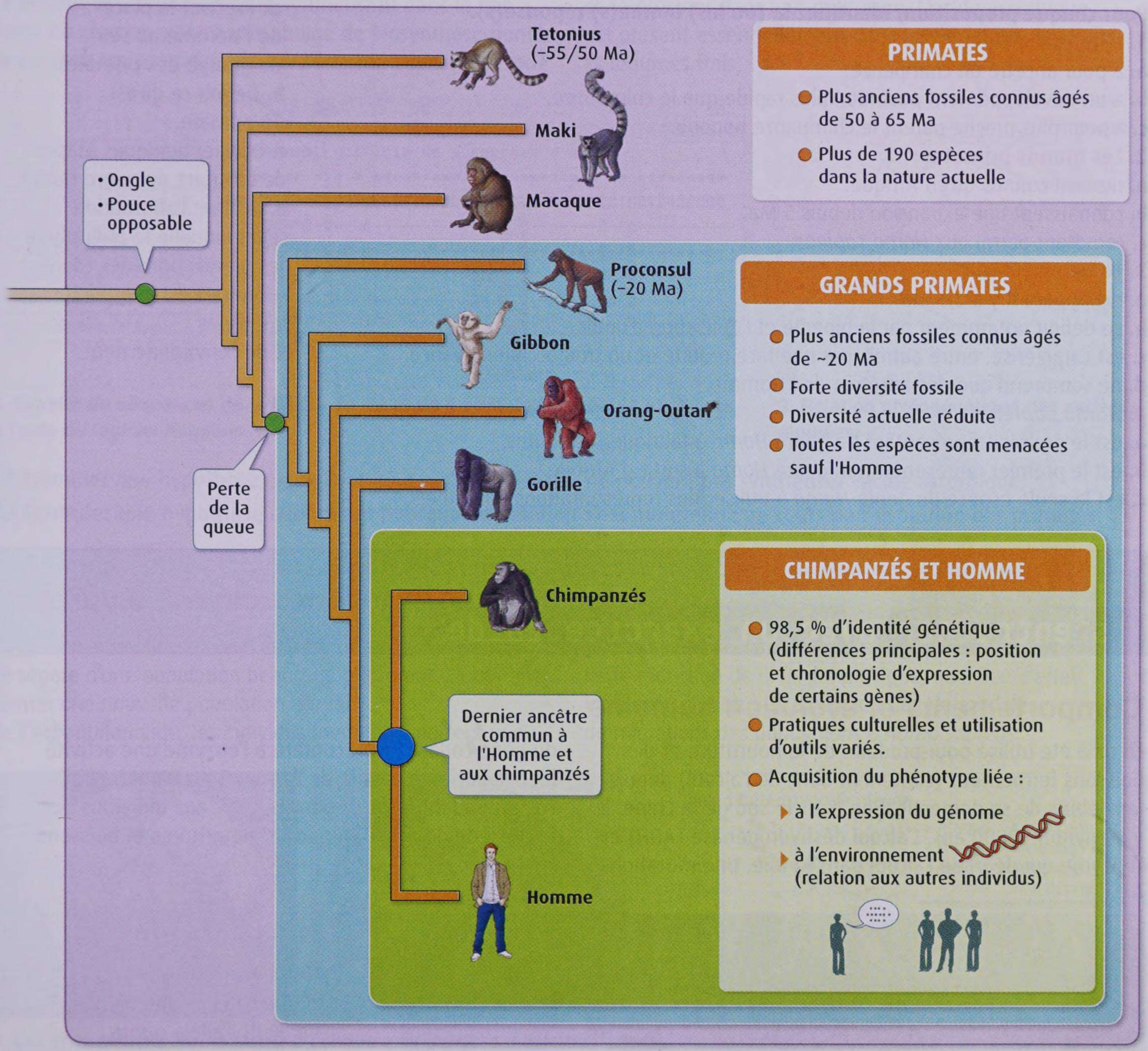
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Ancêtre commun : entité placée au nœud d'un arbre phylogénétique. Un ancêtre commun ne correspond pas à une espèce fossile identifiée : on ne connaît de lui que les caractères qu'il a transmis aux espèces situées au bout des branches partant du nœud considéré.
Grand primate : primate caractérisé par un appendice nasal correspondant à un nez, par des orbites fermées, par des narines rapprochées et par l'absence de queue.
Primate : mammifère caractérisé notamment par la présence d'un pouce opposable et d'ongles.

L'essentiel par l'image

La place de l'Homme au sein des primates



Le genre *Homo*

- Regroupe l'Homme actuel et une dizaine d'espèces fossiles caractérisées notamment par :
  - une face réduite
  - une mandibule parabolique
  - une bipédie stricte avec aptitude à la course à pied
- Les relations de parenté au sein du genre *Homo* ne sont pas résolues.

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. L'Homme :

a. a pour ancêtre un chimpanzé.
b. a un développement postnatal plus rapide que le chimpanzé.
c. a pour plus proche parent le chimpanzé bonobo.

2. Les grands primates :

a. ne sont connus qu'en Afrique.
b. connaissent une expansion depuis 5 Ma.
c. comptent parmi eux *Homo sapiens*.

3. Le genre *Homo* :

a. est apparu il y a 2,5 Ma.
b. se définit notamment par la bipédie et l'utilisation d'outils.
c. est caractérisé, entre autres, par une face réduite et un trou occipital avancé.
d. ne comprend que des ancêtres de l'Homme.

4. *Homo sapiens* :

a. est le premier représentant du genre *Homo* à fabriquer des outils.
b. est le premier représentant du genre *Homo* à sortir d'Afrique.
c. est la seule espèce du genre *Homo* à utiliser des représentations figuratives.

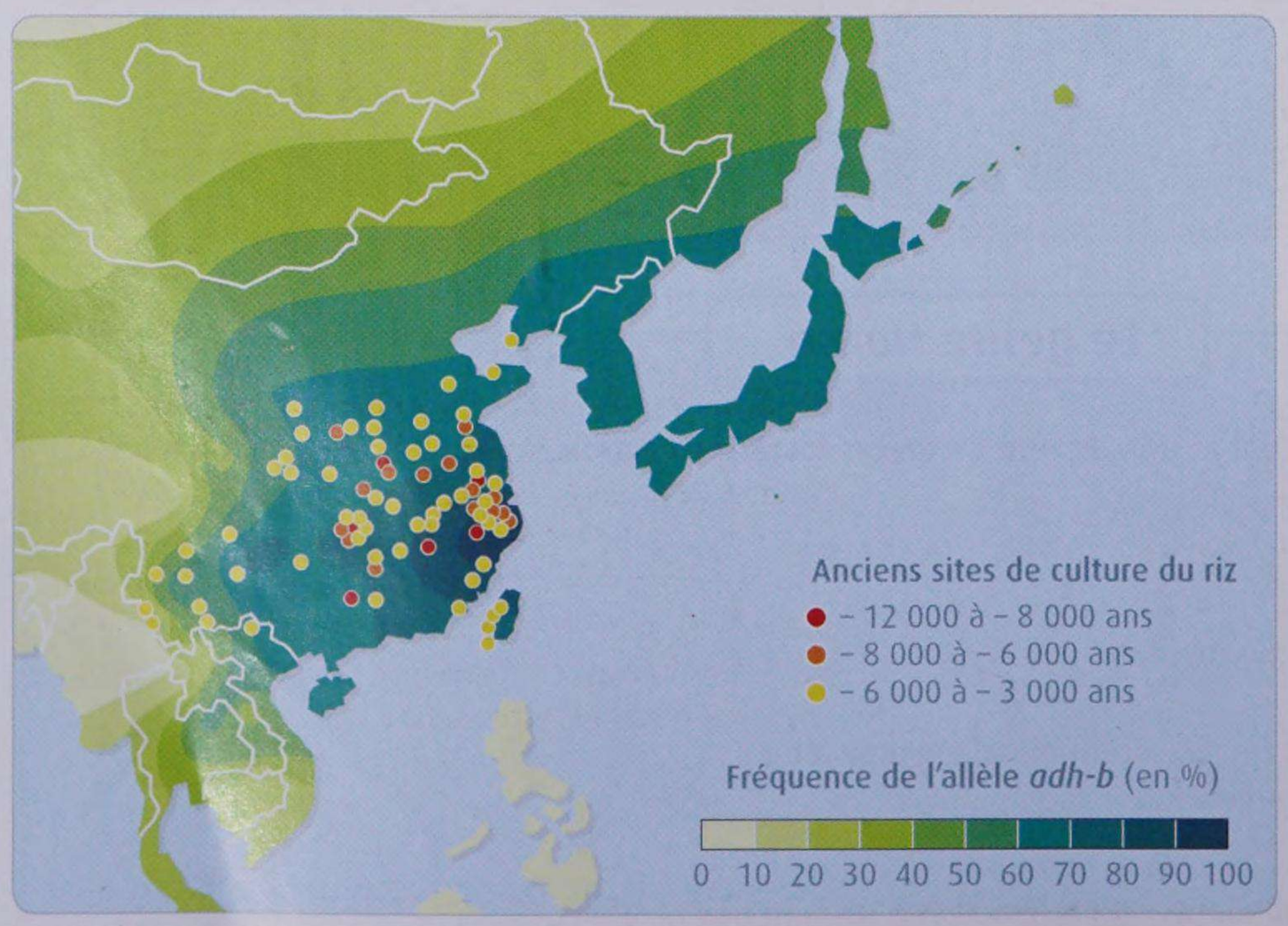
2 Savez-vous ?

a. Préciser la place de l'Homme au sein du groupe des primates.
b. Définir ce qu'est un primate.
c. Donner quelques étapes de l'histoire du genre *Homo*.
d. Justifier l'affirmation selon laquelle le phénotype des grands primates (dont l'Homme) est le produit des gènes et de l'environnement.

s'entraîner avec un exercice guidé

3 Comportements et évolution humaine

Le riz a été utilisé pour produire de la nourriture et des boissons fermentées (contenant donc de l'alcool) depuis les débuts de sa domestication dans le sud de la Chine, il y a environ 12000 ans. L'alcool déshydrogénase (ADH) est l'enzyme qui dégrade l'alcool dans le foie. Une mutation du gène codant l'ADH confère à l'enzyme une activité bien supérieure à celle de l'enzyme non mutée. L'allèle correspondant (*adh-b*) permet donc aux individus qui le possède de mieux supporter nourritures et boissons fermentées.



1. Fréquence actuelle de l'allèle *adh-b* et localisation des premiers sites de culture du riz en Asie du Sud-Est.

Un peu d'aide

• Saisir des informations :
– Décrivez la distribution géographique actuelle de l'allèle *adh-b*.
– Localisez les plus anciens sites de culture du riz.

• Raisonner et conclure :
– Proposez une hypothèse expliquant l'apparition, la sélection et l'expansion du gène *adh-b*.
– Concluez quant à l'évolution de l'Homme en lien avec ses comportements.

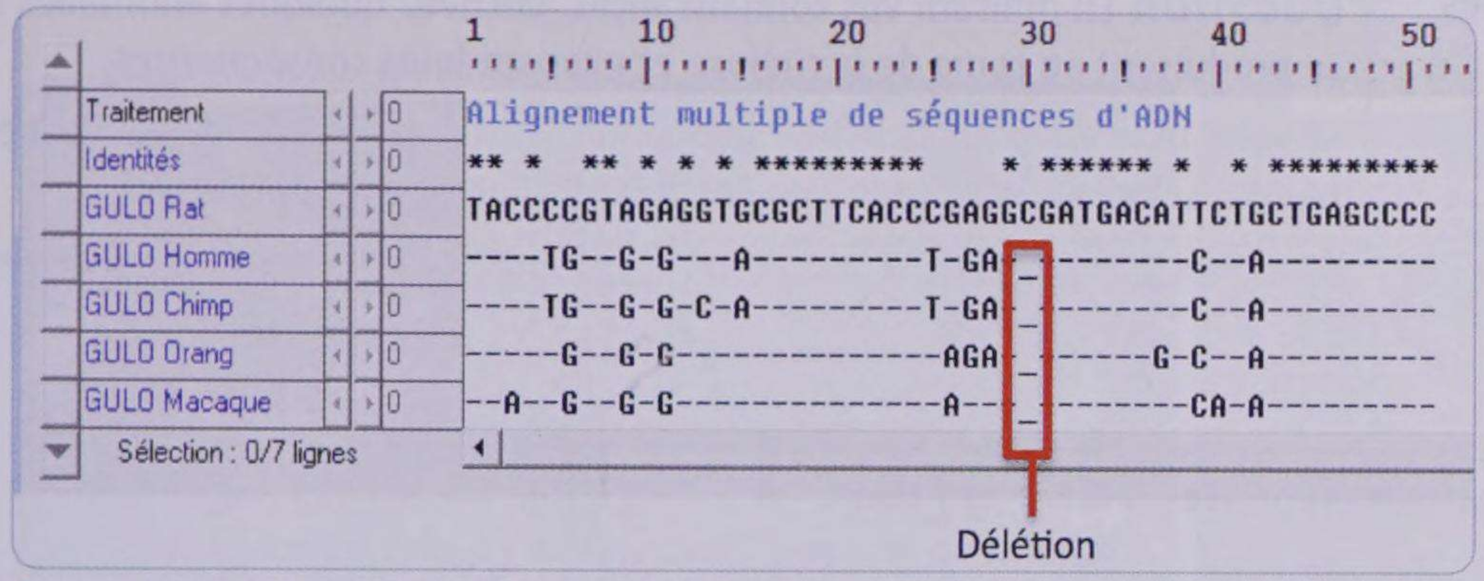
QUESTION Montrez sur l'exemple proposé que l'évolution de l'Homme a été influencée par ses comportements.

Appliquer ses connaissances

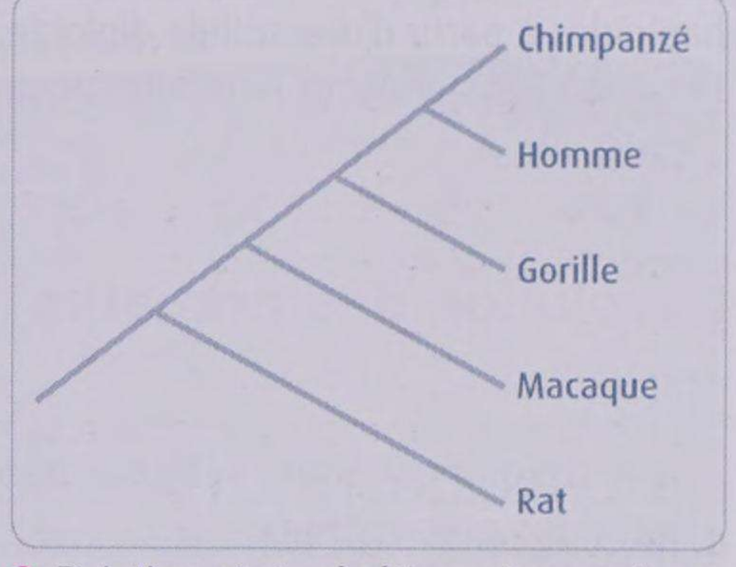
4 Vitamine C et évolution des primates

Expliquer des résultats expérimentaux

L'acide ascorbique (vitamine C) est un cofacteur nécessaire à la réalisation de nombreuses réactions du métabolisme. La plupart des mammifères le synthétisent dans le foie à partir du glucose grâce à une chaîne de biosynthèse dont la dernière étape est catalysée par l'enzyme L-guluno lactone oxydase (GULO). Toutefois, les primates ne peuvent pas synthétiser l'acide ascorbique et doivent donc se le procurer dans leur nourriture. L'acide ascorbique est présent essentiellement dans les végétaux, les fruits et légumes frais.



1. Extraits de séquences de la GULO du rat et de 4 primates comparés et alignés à l'aide du logiciel Anagène.



2. Relation phylogénétique des espèces étudiées.

❶ Formulez une hypothèse expliquant pourquoi les primates ne peuvent pas synthétiser l'acide ascorbique.

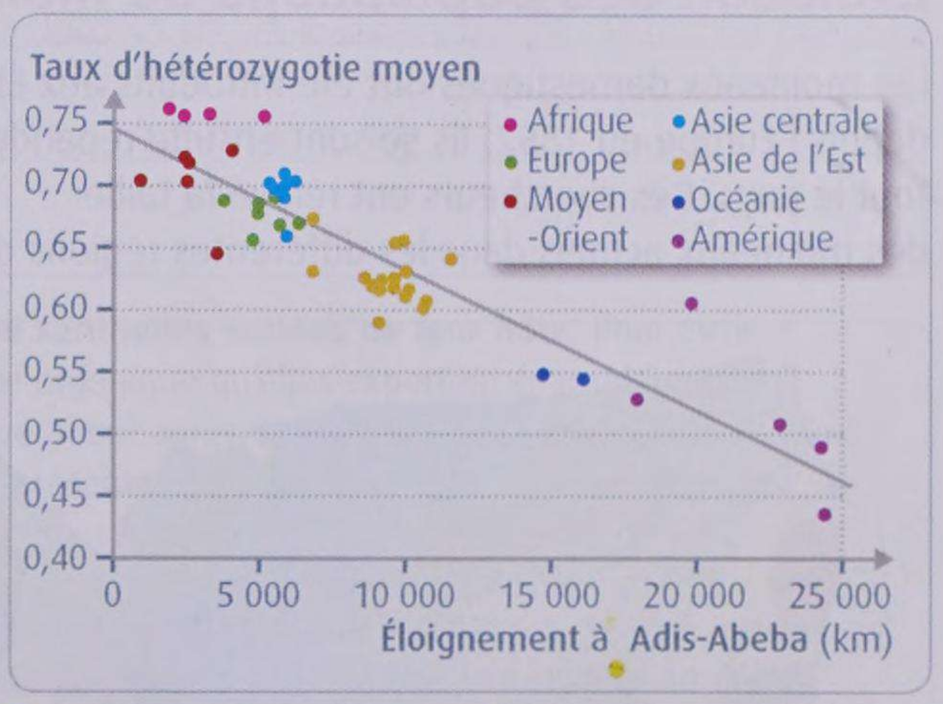
❷ Formulez une hypothèse expliquant pourquoi la délétion s'est maintenue au cours de l'évolution des primates.

5 Origine de l'Homme moderne et du langage

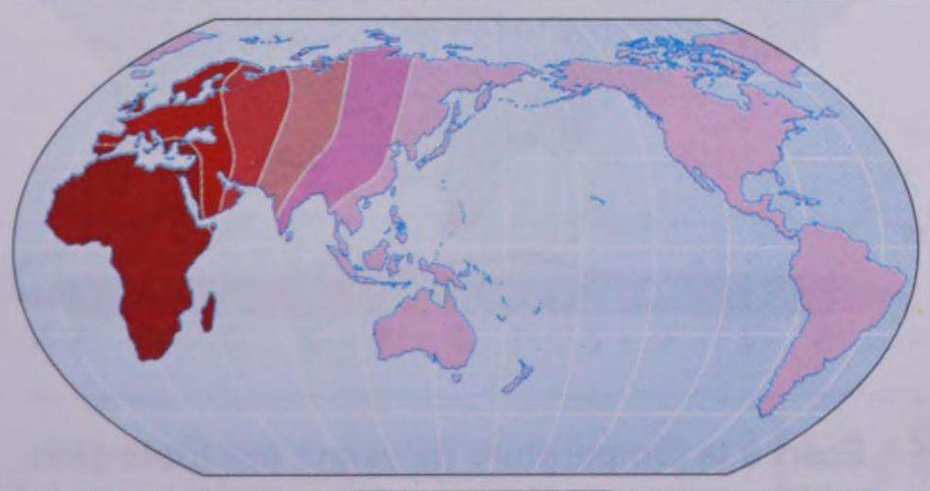
Mettre en relation des informations

On parle de fondation lorsqu'un petit nombre d'individus se sépare d'une population beaucoup plus grande, pour aller former une nouvelle population. Du fait de l'échantillonnage, les individus fondateurs portent une partie seulement des allèles de la population souche. Cette réduction de diversité allélique, qualifiée d'effet fondateur, à contribué à l'élaboration de modèles de migrations des populations d'*Homo sapiens*.

1. Les plus anciens *Homo sapiens* connus à ce jour. Les squelettes fossiles de l'Homme de Herto (160 000 ans, à gauche) et OMO1 (195 000 ans, à droite) ont tout deux ont été trouvés en Éthiopie.



2. Variation de l'hétérozygotie dans les populations humaines en fonction de l'éloignement à Addis-Abeba (Éthiopie). Pour un locus donné, le taux d'hétérozygotie est le nombre observé d'individus hétérozygotes divisé par le nombre total d'individus dans la population. L'hétérozygotie moyenne est égale à la moyenne arithmétique des taux d'hétérozygotie pour les différents loci étudiés.



3. La diversité des phonèmes utilisés dans 504 langues parlées à la surface du globe. Les phonèmes constituent les plus petites unités de son d'une langue (le français en compte 37).

● Montrez que ces documents suggèrent que les populations humaines actuelles sont issues d'une population ancestrale d'origine africaine.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 Les anomalies au cours de la méiose

La méiose est une division cellulaire particulière qui permet d'obtenir des cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. Des anomalies peuvent toutefois survenir.

QUESTION **En utilisant vos connaissances, décrivez quelques anomalies qui se produisent au cours de la méiose et exposez leurs conséquences.**

✔ Votre réponse sera présentée sous la forme d'un exposé construit, illustré par des schémas, et encadré par une introduction et une conclusion.

2 L'évolution des primates

QCM

Pour chaque question, sélectionnez la bonne réponse parmi les propositions.

1. L'Homme et le chimpanzé :

a. ont le même nombre de chromosomes.
b. présentent des phénotypes morphologiques construits grâce à l'expression de gènes du développement.
c. ont des génomes très proches : plus de 90 % de leurs nucléotides sont identiques.
d. ont des caractères crâniens identiques.

2. Les primates :

a. sont un groupe d'êtres vivants en pleine expansion à l'époque actuelle.
b. sont bipèdes.
c. font partie du genre *Homo*.
d. sont présents sur tous les continents.

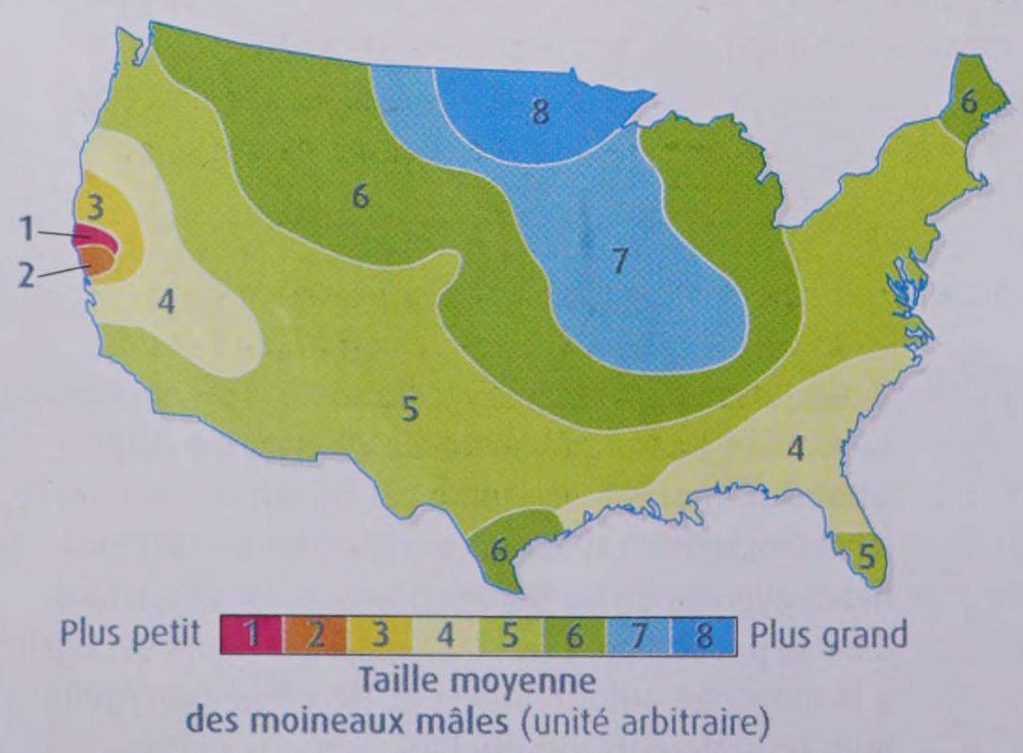
Exploiter des résultats expérimentaux

3 points

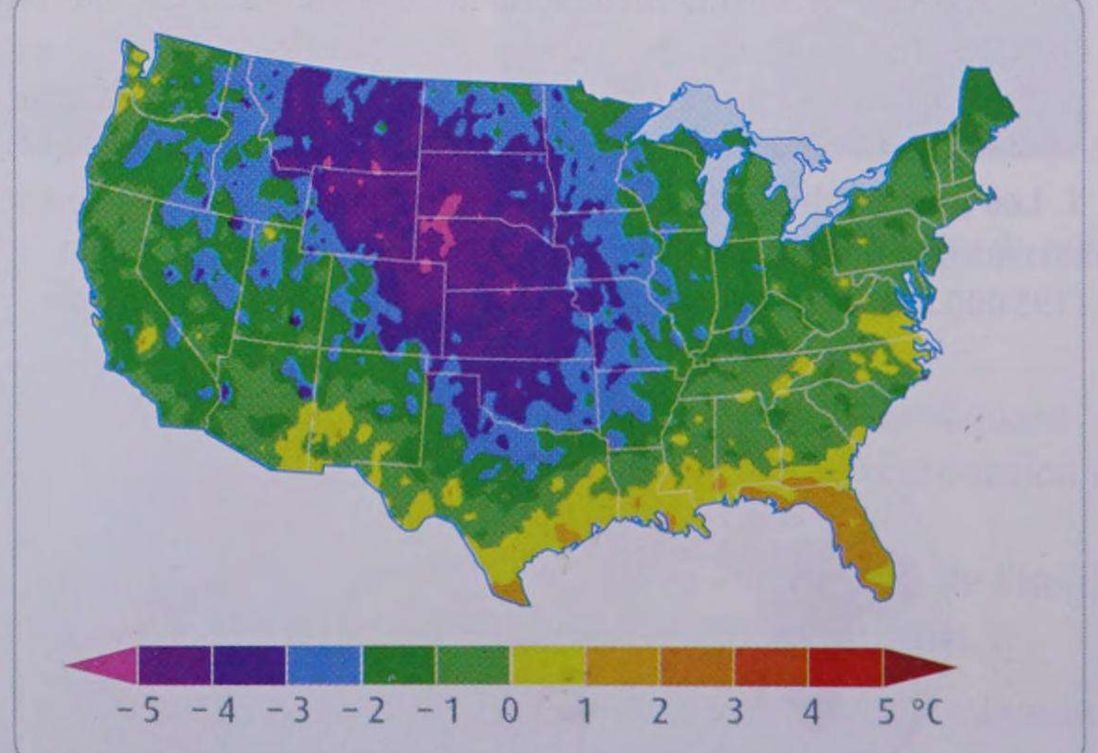
3 Évolution des populations de moineaux domestiques aux États-Unis

Les moineaux domestiques ont été introduits aux États-Unis depuis l'Europe en 1852. Ils se sont ensuite répandus dans tout le pays. Des chercheurs ont relevé la taille des moineaux actuels dans les différentes régions du pays.

On sait par ailleurs que chez une espèce d'oiseau donnée, les animaux de plus grande taille supportent beaucoup mieux les basses températures.



1 Taille moyenne des moineaux domestiques aux États-Unis.



2 Écart à la température moyenne aux États-Unis (en 2009).

QUESTION Expliquez la répartition actuelle des tailles des moineaux domestiques aux États-Unis et imaginez un scénario simple pouvant mener ces populations à former plusieurs espèces distinctes.

Résoudre un problème scientifique

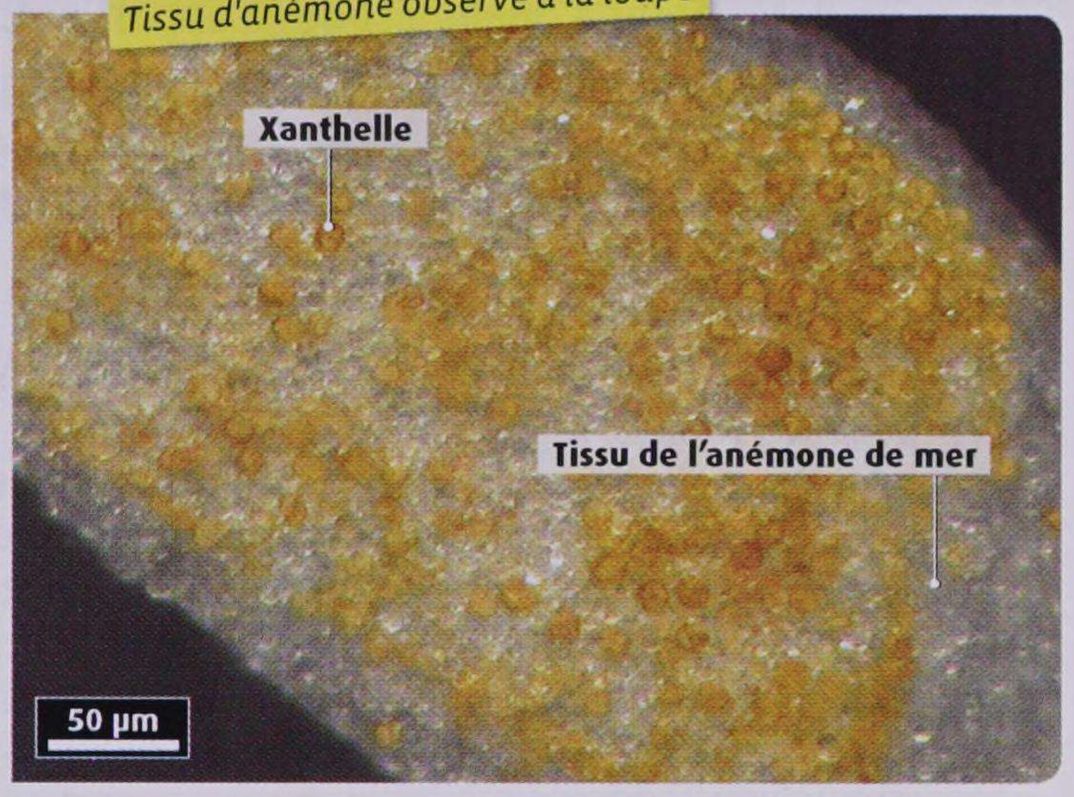
5 points

4 Une association entre xanthelles et anémones de mer

Les anémones de mer sont des parents proches des coraux. De par la diversité de leurs couleurs (brun, rouge, vert), elles évoquent des fleurs, ce qui leur a valu à la fois leur nom français et la désignation scientifique de leur groupe, les anthozoaires (en grec : *antho* = fleur et *zoa* = animal). Elles vivent fixées sur les rochers, mais sont capables de se déplacer lentement en glissant (à moins de 10 cm par heure).

Anémone de mer

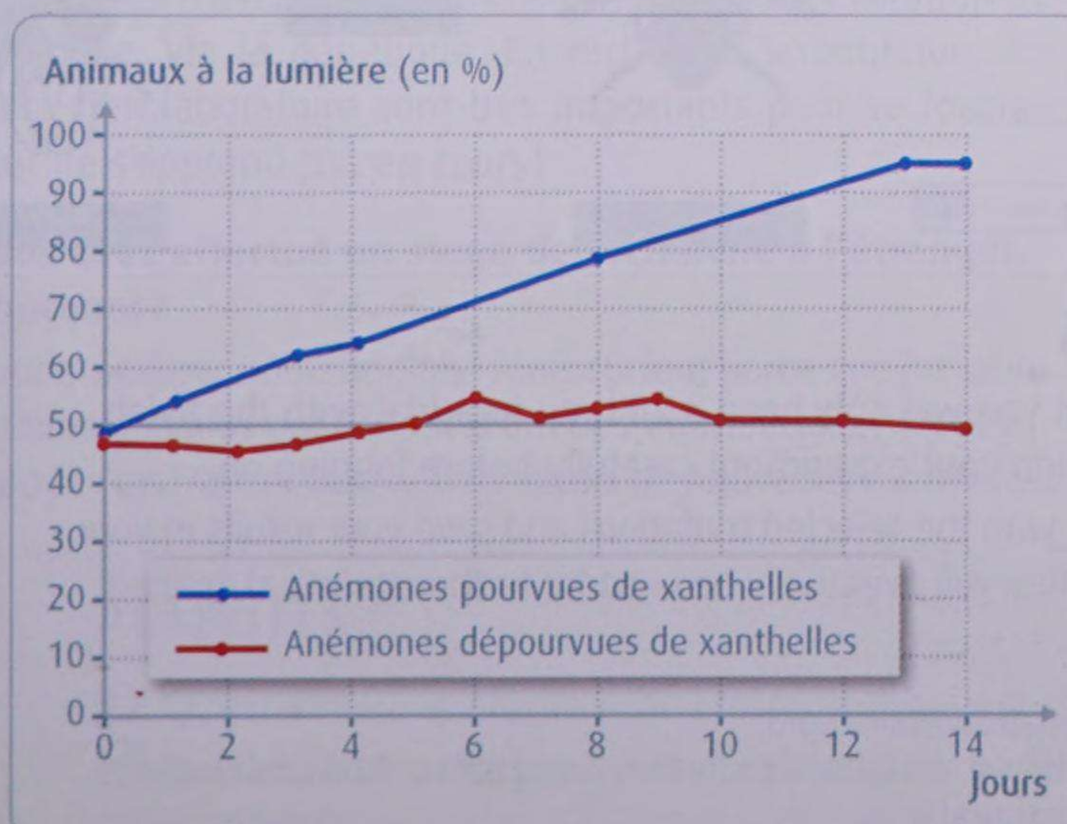
Tissu d'anémone observé à la loupe



1 Des échanges de matières nutritives entre les xanthelles et l'anémone de mer. Les anémones de mer vivent en association avec des algues unicellulaires, les xanthelles, qu'elles abritent au sein même de leurs cellules. Par la photosynthèse, les xanthelles transforment le carbone minéral en molécules organiques qu'elles fournissent en partie aux anémones, tandis que ces dernières libèrent des matières minérales (provenant de la dégradation de molécules organiques) utilisées par les algues.

Milieu de culture testé	Quantité de ^{14}C fixé par l'algue (coups par minute)	Quantité de ^{14}C exporté (exprimée en % du ^{14}C fixé)
Eau de mer	1,7	31
Broyat d'une anémone pourvue de xanthelles	14,1	58
Broyat d'une anémone dépourvue de xanthelles	4,5	30

2 Effet de différents milieux de culture sur l'activité photosynthétique de xanthelles isolées de leur hôte. Pour évaluer l'activité photosynthétique de xanthelles isolées ainsi que la quantité de carbone organique qu'elles exportent (par relargage dans le milieu de culture), du carbone minéral radioactif (^{14}C) leur est fourni. Une heure après, la quantité de carbone radioactif fixé dans les molécules organiques des xanthelles et dans les molécules organiques présentes dans le milieu de culture est mesurée.



3 Étude du comportement des anémones de mer, pourvues ou non de xanthelles, vis-à-vis de la lumière. Au début de l'expérience, des anémones de mer, pourvues ou non de xanthelles, sont réparties uniformément dans un aquarium dont une moitié est éclairée et l'autre est à l'ombre. On compte ensuite, au fil du temps, le nombre d'anémones présentes dans chacune des régions de l'aquarium.

QUESTION Justifiez l'emploi du terme « symbiose » pour caractériser l'association étudiée, et montrez que le phénotype de chacun de ses partenaires, en particulier son comportement, est modifié par l'association.

ATELIERS D'EXPLORATION

SCIENCES ACTUALITÉ — La diversité du genre *Homo* s'agrandit

En 2008, la fouille de la grotte de Denisova, en Sibérie, a livré une phalange fossile appartenant à un jeune individu du genre *Homo*. Son âge serait compris entre 30 000 et 50 000 ans. L'os ne permettant pas de déterminer à quelle espèce il appartient, le séquençage de l'ADN fossile a été réalisé.

ACTIVITÉS

❶ Recherchez au CDI ou sur Internet des informations sur le métissage des hommes de Néandertal avec *Homo sapiens*.

❷ Denisova serait la 1re espèce humaine découverte à partir d'une analyse génétique : discutez des limites de ce résultat.

❸ À partir de vos recherches, montrez que cette découverte pourrait bouleverser l'histoire des populations humaines.

POUR VOUS GUIDER

- www.pourlascience.fr
- www.hominides.com

La phalange de Denisova : ni celle d'un Néandertalien ni celle d'un homme moderne

« D'après les généticiens, les Néandertaliens et Dénisoviens faisaient initialement partie d'une seule et même lignée, qui se serait séparée de celle des hommes modernes il y a 800 000 ans. Puis, 150 000 ans plus tard, ils se seraient séparés à leur tour.

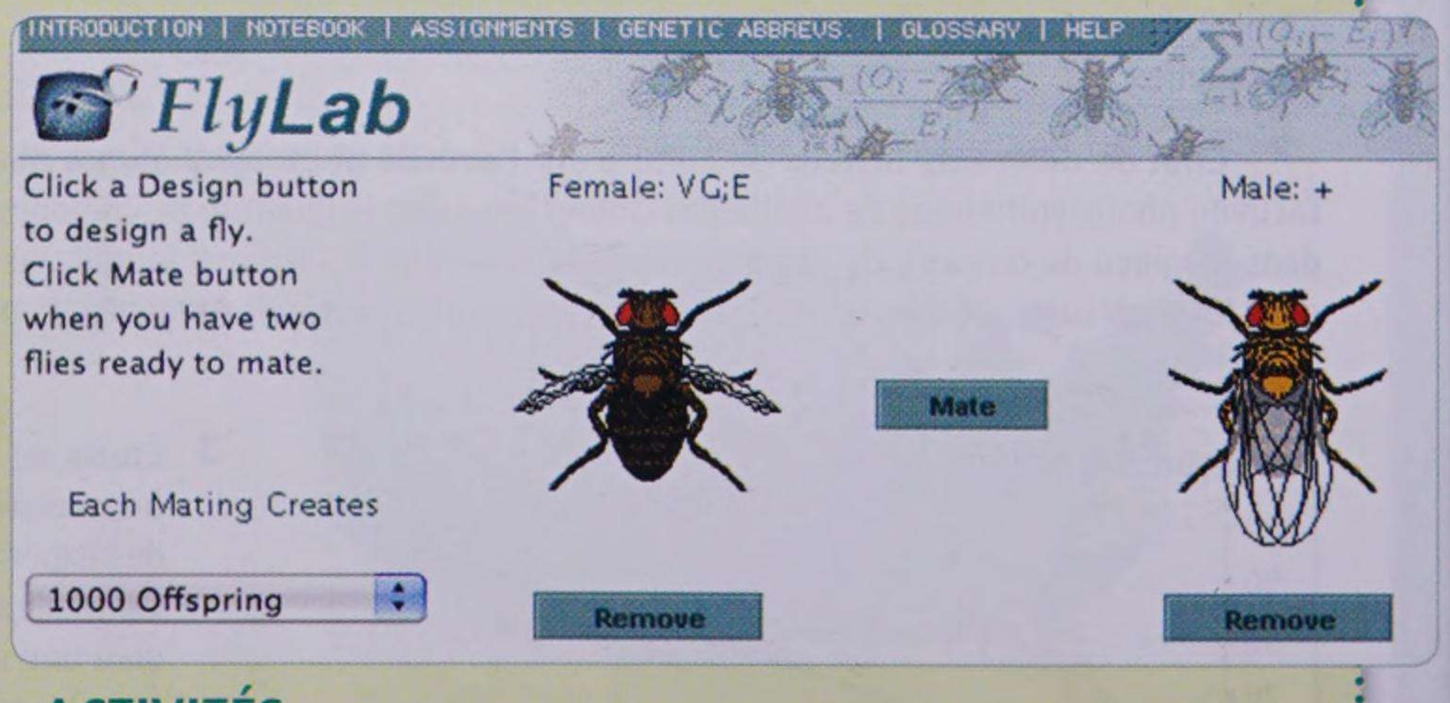
Bien que les Dénisoviens aient probablement côtoyé les hommes modernes en Europe et en Asie, ils ne se sont pas métissés avec eux, à l'inverse des hommes de Néandertal. En revanche, les chercheurs trouvent à leur grande surprise, des traces de métissage dans le génome des Mélanésiens actuels : leurs ancêtres se seraient donc métissés avec des Dénisoviens. ».

D'après L. Orlando, « Une nouvelle lignée humaine en Sibérie », *Les Dossiers de la Recherche*, octobre 2011.

Prélèvement d'os sur une phalange fossile. Celle de l'homme de Denisova contenait suffisamment d'ADN pour séquencer tout son génome.

SCIENCE IN ENGLISH — Fruit flies cross breeding

Conducting mating experiments in fruit flies carrying different mutations is one of the easiest, cheapest, and most common ways to experiment on basic principles of genetic inheritance. Unfortunately, these experiments are often time-consuming and often involve several requisite tasks. Some of these tasks include cleaning, preparing food, ordering new strains, tracking fungi contamination and selecting, transferring and counting individuals. To enable students to focus on more important research aspects such as experimental design and the analysis of results, several simulation software programs have been developed to replace the need to perform many of these tedious tasks.



ACTIVITÉS

❶ Given that you will only have a 24 hour free trial with the flylab software, design your experiment carefully before logging on.

❷ Mate flies with the selected mutations and save your results in your notebook as they will eventually be used for further statistical analysis.

GUIDE

- www.biologylab.awlonline.com

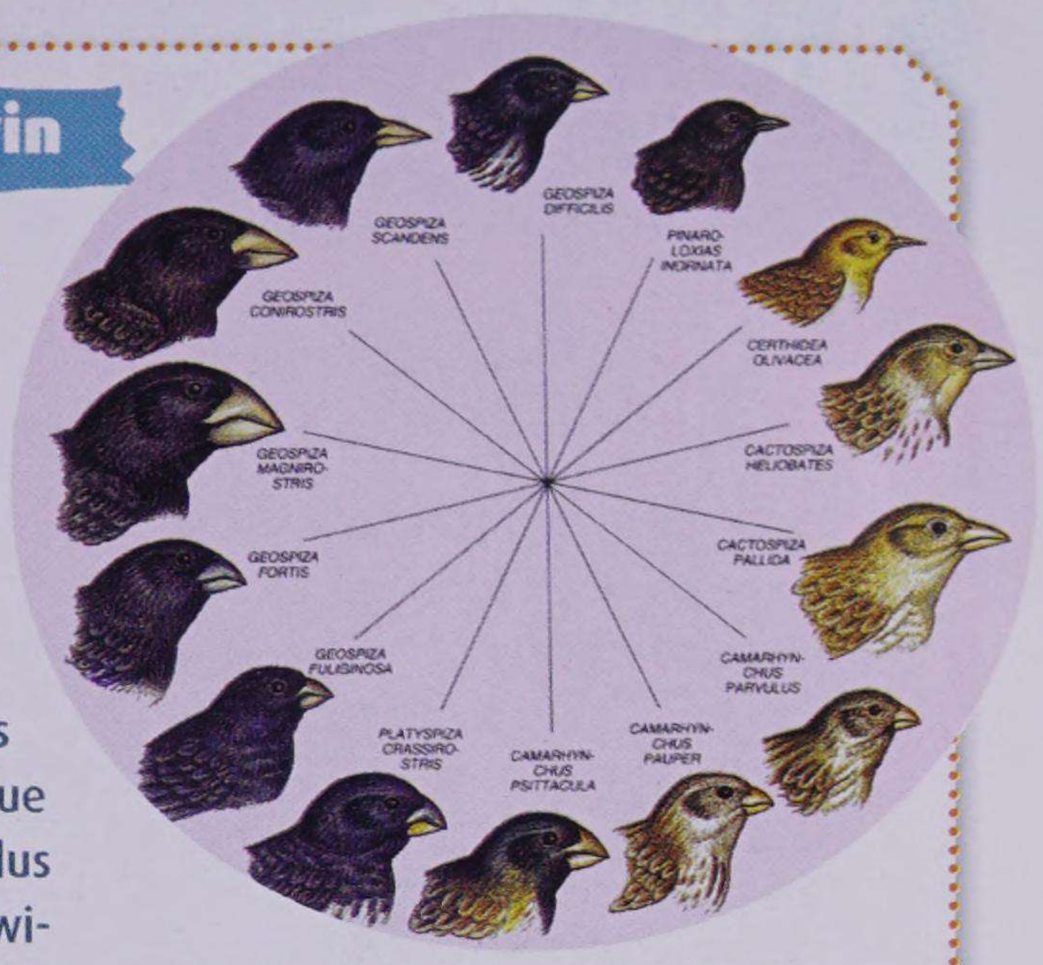
Select Flylab software. In Flylab introduction, select background information to read more on statistical tests.

HISTOIRE DES SCIENCES

Le voyage du Beagle de Darwin

En décembre 1831, Charles Darwin, 22 ans, s'embarque comme naturaliste sur le Beagle. À chaque escale, il observe, collecte, commente les organismes vivants qu'il rencontre. Il s'interroge sur l'adaptation des espèces à leur environnement, sur la parenté entre des espèces disparues (fossiles) et des espèces actuelles et sur la transformation des espèces au cours du temps.

Le voyage durera 5 ans pendant lesquels Darwin fera des milliers d'observations de géologie, de zoologie, de botanique et décrira une centaine de nouvelles espèces. Vingt ans plus tard, il en utilisera une partie pour décrire la théorie darwinienne de l'évolution dans son livre *De l'origine des espèces*. **Ce voyage est un événement majeur dans la vie de Darwin et le fondement d'une révolution dans l'histoire de la biologie.**



Les pinsons des Galápagos étudiés par Charles Darwin. Proches les unes des autres, ces espèces diffèrent légèrement d'une île à l'autre. Darwin émettra l'hypothèse qu'elles proviennent d'un ancêtre commun venu du continent.

ACTIVITÉS

1. Quels exemples et arguments sont utilisés par Darwin en faveur du transformisme (la transformation des espèces au cours du temps) ?
2. Quels exemples et arguments sont utilisés par Darwin en faveur de l'apparentement des espèces ?
3. Quelle sont les questions que Darwin se pose sur les extinctions des espèces ?

POUR VOUS GUIDER

- www.cnrs.fr (tapez « sagascience » et « Darwin »)
- http://acces.ens-lyon.fr/santo/pedagogie/histoire/le-voyage-de-charles-darwin-sur-le-beagle-un-exemple-d2019expedition-scientifique-qui-a-marque-l2019histoire-des-sciences-1
- www.hominides.com

MÉTIER

Étudier à l'étranger

Entretien avec **Nina Marchi**, étudiante en master, et **Rémi Grosjean**, en formation pré-doctorale, tous les deux en Erasmus à l'Université de Copenhague.

Quelle carrière envisagez-vous ?

Nous voulons devenir chercheurs : Rémi s'intéresse à la chimie des matériaux et Nina à l'origine et à l'évolution de l'Homme, via la génétique. En recherche scientifique, les stages en laboratoire sont très importants pour se former, tout ne s'apprend pas en cours !

Vous avez effectué un stage de recherche à l'étranger. Pourquoi ?

Pour améliorer notre anglais ! Mais surtout parce que les laboratoires qui nous ont accueillis ont des thématiques non développées en France. Cela nous a appris de nouvelles méthodes, d'autres façons de faire de la recherche. Bien sûr, cela a aussi été l'occasion de voyager et de découvrir un nouveau pays.

Avez-vous apprécié cette expérience ?

Une fois les soucis administratifs et logistiques réglés (convention de stage, logement...), nous avons pu apprécier Copenhague. Le vélo y est indispensable pour circuler, la ville est jolie, vaste, très agréable. Et même si la langue danoise paraît rebutante, la plupart des Danois parlent anglais. Donc une expérience positive. Farvel !

ACTIVITÉS

1. Qu'est-ce que le programme Erasmus et qui est concerné ?
2. Quelles sont les autres voies possibles pour partir étudier à l'étranger ?

POUR VOUS GUIDER

- www.injep.fr (programme européen jeunesse en action, service volontaire européen)
- www.erasmusworld.org
- www.dfh-ufa.org.fr (université franco-allemande)

THÈME 2

Relation entre organisation et mode de vie des plantes à fleurs

MOBILISER SES ACQUIS p. 98

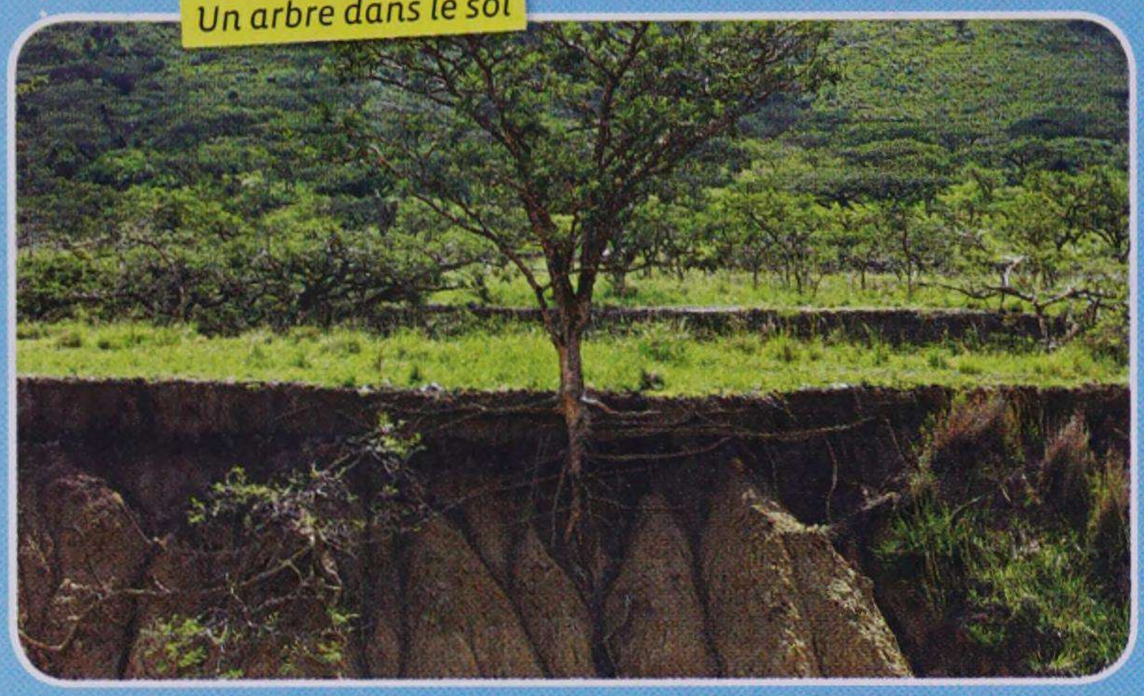
1. Organisation des plantes à fleurs et vie fixée p. 101

2. Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée p. 117

Guêpe dans une fleur de capucine.

1. Comment les végétaux peuplent-ils les milieux de vie ?

Un arbre dans le sol



Différents organes d'un chêne

1. De quoi se composent les paysages végétaux terrestres ?
2. Montrez que les végétaux chlorophylliens ne se trouvent pas dans leur écosystème sous une seule forme.
3. Précisez ce qu'est un sol et son rôle pour les végétaux chlorophylliens.

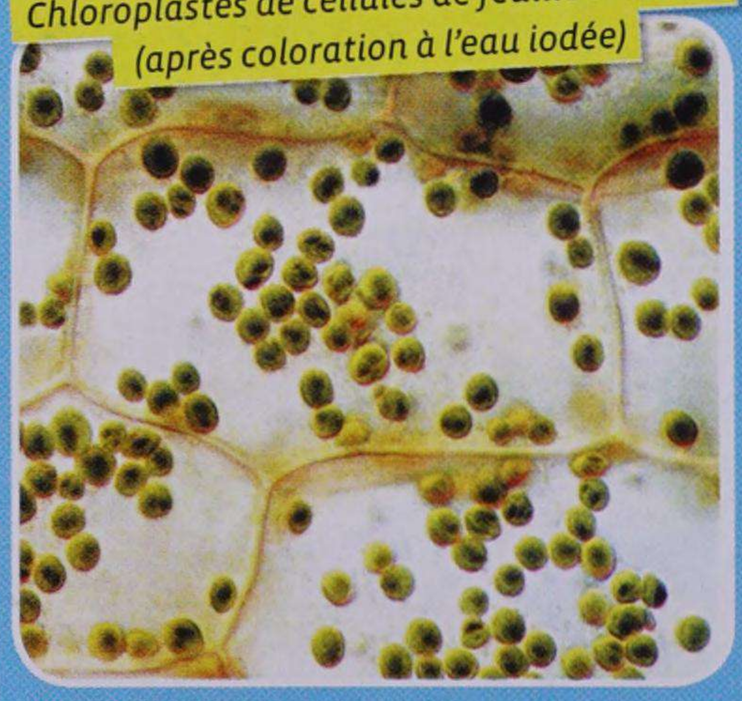
mots clés

Biosphère : ensemble des milieux où se trouvent des êtres vivants.
Écosystème : milieu de vie constitué d'un ensemble d'êtres vivants (biocénose) caractéristique des conditions physico-chimiques (biotope) présentes.

2. Quelle est l'origine de la matière chez les végétaux ?

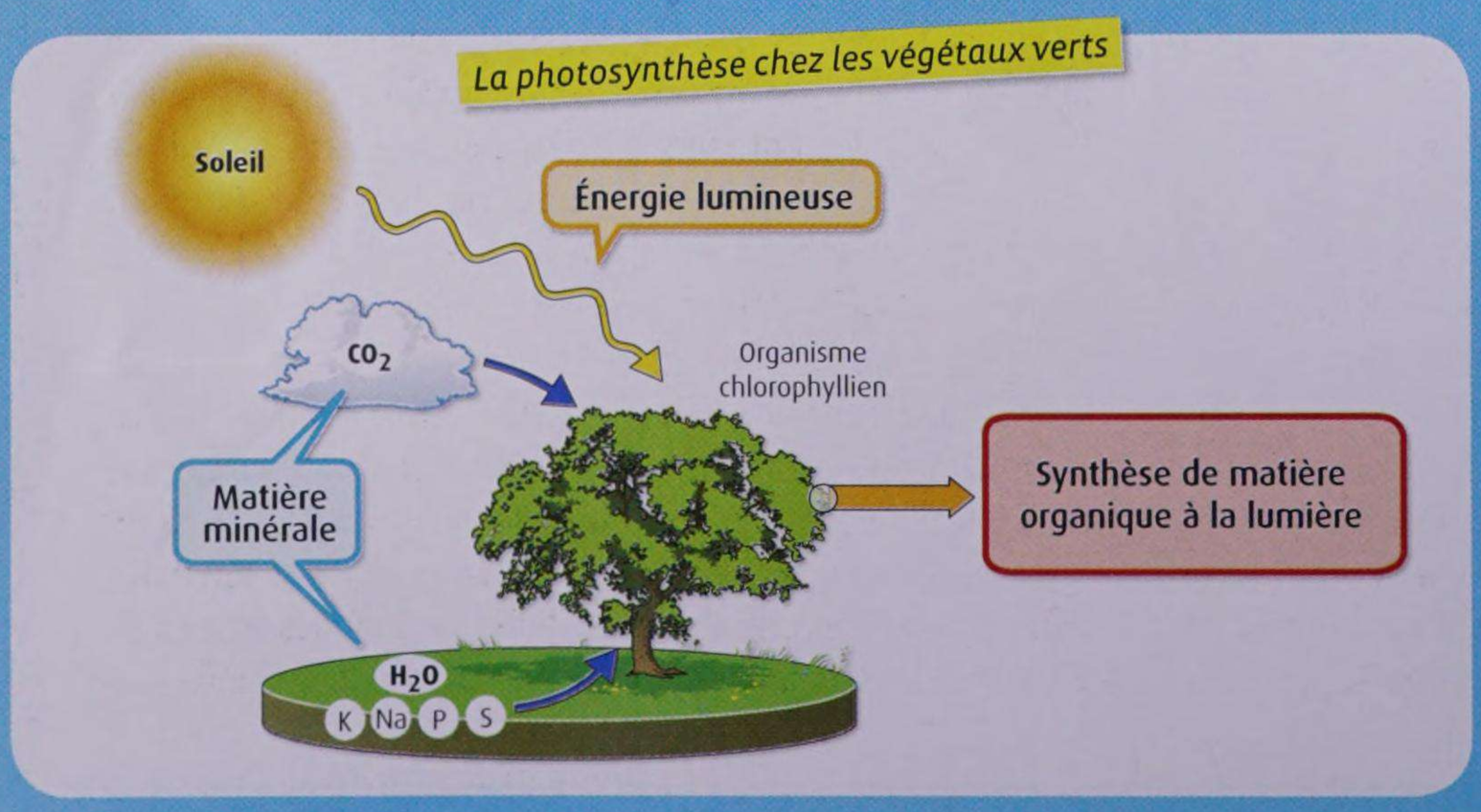
Moisson d'un champ de blé

Chloroplastes de cellules de feuille d'élodée (après coloration à l'eau iodée)



1. Montrez que de la matière végétale est créée chaque année, dans un écosystème comme ce champ de blé.
2. Quel rôle jouent les chloroplastes dans la production de matière végétale ?
3. Comment se déroule la photosynthèse chez les végétaux chlorophylliens ?

La photosynthèse chez les végétaux verts

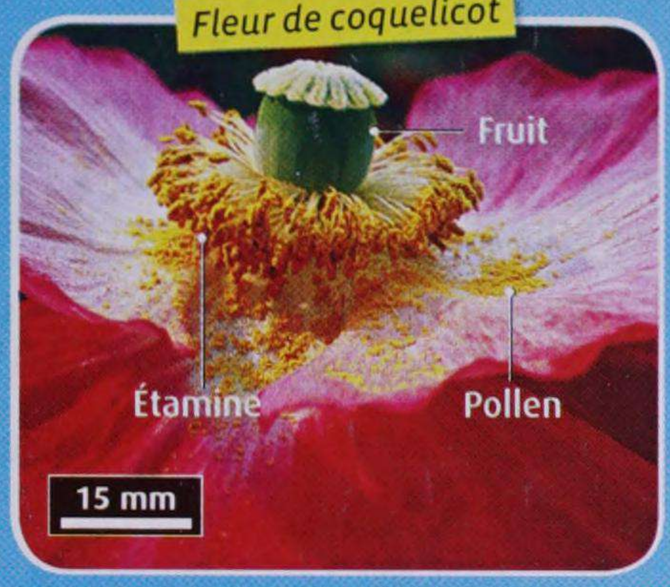


Chloroplaste : organite des cellules végétales chlorophylliennes qui contiennent la chlorophylle.
Matière organique : molécules carbonées (glucides, protides, lipides...) caractéristiques des êtres vivants.

3. Comment se reproduisent les plantes à fleurs ?

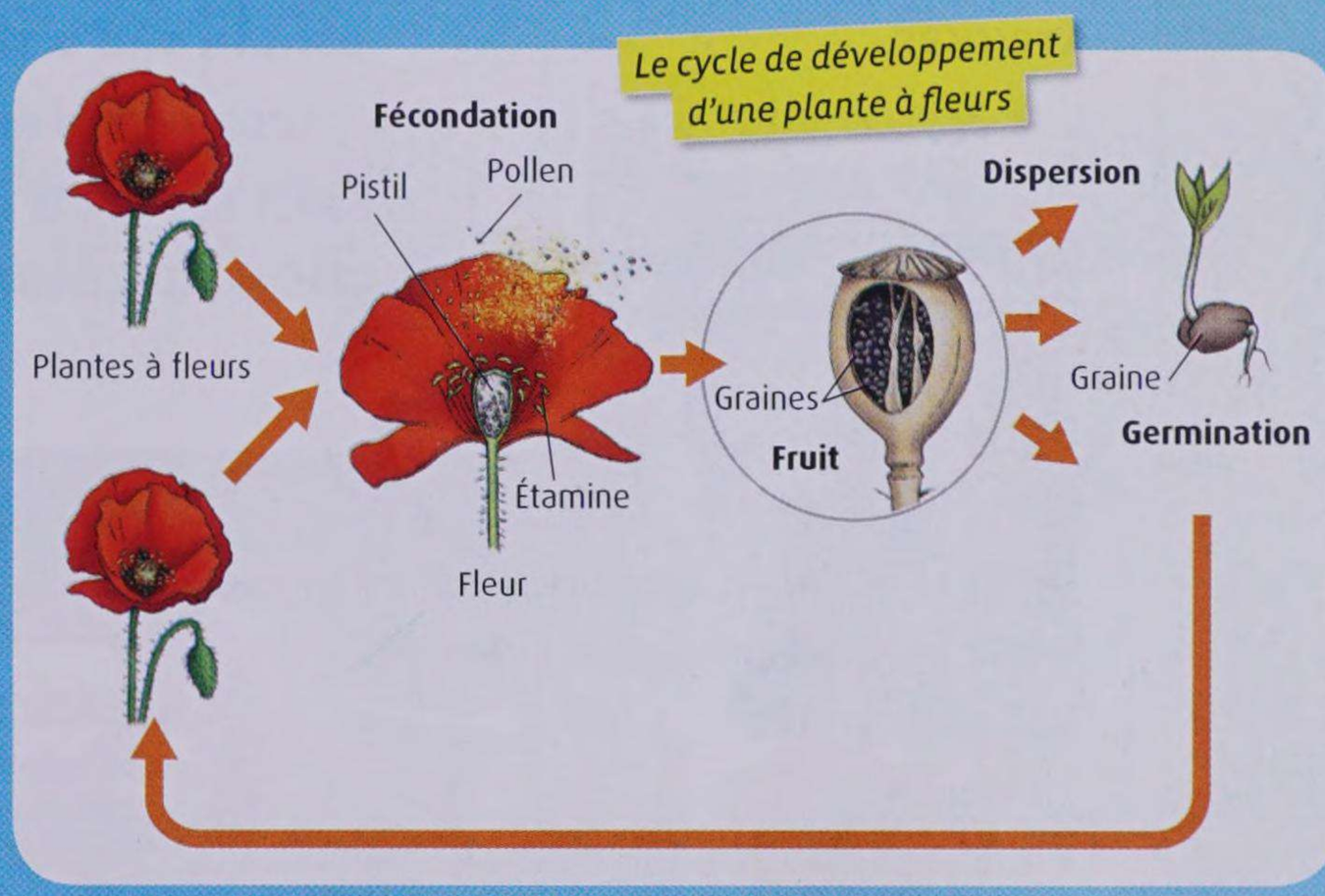
Des spermatozoïdes autour d'un ovule humain

Fleur de coquelicot



Abeille chargée de pollen

Le cycle de développement d'une plante à fleurs



1 Rappelez ce qu'est la reproduction sexuée chez les êtres vivants.

2 Comment la reproduction sexuée se déroule-t-elle chez une plante à fleurs ?

3 Identifiez les rôles des graines d'une plante à fleurs.

Gamète : cellule reproductrice mâle ou femelle, contenant la moitié des chromosomes de l'espèce.
Pollinisation : dépôt de pollen sur le pistil d'une fleur.

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 2

Les **végétaux chlorophylliens** peuplent tous les **écosystèmes** : à côté des fougères et des mousses, on trouve le plus souvent des plantes à fleurs, arbres, arbustes et plantes herbacées. Ils occupent leur milieu de vie sous différentes formes (graines, bourgeons, organes souterrains) selon le rythme des saisons. Ils se fixent dans le sol, milieu de vie résultant de l'interaction entre les roches et la **biosphère**, où ils puisent des matières minérales (eau, sels minéraux).

Dans un écosystème comme un champ de blé, les végétaux chlorophylliens créent de la matière au cours d'une saison : après avoir semé quelques kilogrammes de graines par hectare, l'agriculteur y récoltera quelques mois plus tard, plusieurs tonnes de matière. Cette production primaire de matière est le résultat de la **photosynthèse** où les végétaux verts fabriquent leurs **matières organiques** à partir de matières minérales (eau, sels minéraux, CO_2) prélevées dans leur milieu et grâce à l'énergie solaire et à la chlorophylle contenue dans les **chloroplastes** des cellules.

Chez les animaux comme chez les végétaux, la reproduction sexuée nécessite la fusion d'un **gamète** mâle et d'un gamète femelle ; à l'issue de cette **fécondation**, il forme une cellule-œuf, point de départ d'un nouvel individu, différent des parents. Chez les plantes à fleurs, cette phase se fait après **pollinisation**. Les graines qui en résultent sont des formes de dispersion de la plante et de colonisation de son milieu.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Organisation des plantes à fleurs et vie fixée 101

UNITÉ 1 Les plantes à fleurs dans leur environnement 102
UNITÉ 2 Les échanges des plantes à fleurs avec leur milieu 104
UNITÉ 3 La circulation de matières dans une plante à fleurs 106
UNITÉ 4 La lutte contre les agressions chez les plantes à fleurs 108
Bilan des unités 110
L'essentiel 112
Exercices 114

CHAPITRE 2 Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée 117

UNITÉ 1 L'organisation des fleurs 118
UNITÉ 2 De la fleur au fruit 120
UNITÉ 3 La réalisation de la pollinisation croisée 122
UNITÉ 4 La dispersion des graines 124
Bilan des unités 126
L'essentiel 128
Exercices 130
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 132
OBJECTIF BAC Évaluation des compétences expérimentales 134
ATELIERS D'EXPLORATION LE COIN DU LABO – MÉTIER – ENQUÊTE – INFORMATIQUE 136

CHAPITRE 1

Organisation des plantes à fleurs et vie fixée

La consommation de ses feuilles par un insecte n'est qu'un exemple des nombreux avatars de la vie d'une plante à fleurs. Au fil de l'évolution, ces plantes ont vu leur organisation s'adapter aux contraintes de la vie fixée à l'interface entre deux milieux très différents et variables au cours du temps : le sol et l'atmosphère.

| Hanneton dévorant une feuille.

En quoi l'organisation des plantes à fleurs est-elle adaptée à leur vie fixée à l'interface entre le sol et l'atmosphère ?

UNITÉ 1

Les plantes à fleurs dans leur environnement

De l'arbre au brin d'herbe, les plantes à fleurs présentent une grande diversité d'organisation, de forme et de taille. Contrairement à la majorité des animaux, elles sont incapables de se déplacer : elles mènent une vie fixée.

Quelles caractéristiques présente l'organisation des plantes à fleurs en relation avec leur vie fixée ?

Observer les plantes à fleurs d'une prairie

SORTIE DE TERRAIN

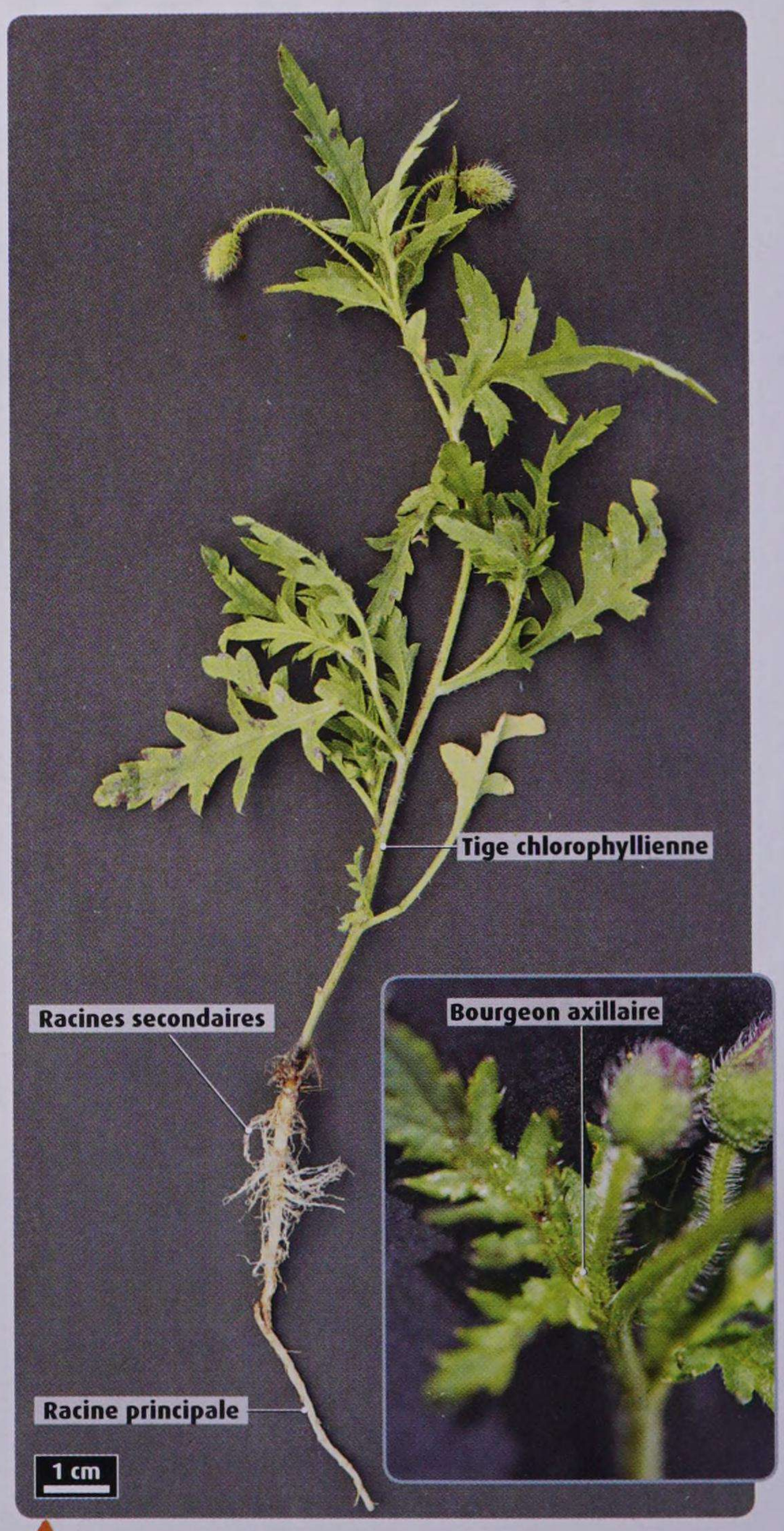
1 Une prairie dans le Jura. La prairie est un écosystème composé exclusivement de plantes herbacées, c'est-à-dire caractérisées par la présence d'une tige non rigide. Les plantes herbacées peuvent vivre plusieurs années (plantes vivaces) ou bien mourir à l'approche de l'hiver (plantes annuelles). Leur croissance est continue pendant la belle saison. Une prairie est majoritairement composée de poacées (nouveau nom des graminées) vivaces, associées à d'autres plantes herbacées (pissenlits, coquelicots, trèfles, etc.).

Biomasse (en $t.ha^{-1}$)	Prairie	Forêt
Aérienne	3,12	261
Souterraine	13,8	56,3

2 La répartition de la biomasse végétale dans une prairie et dans une forêt tempérée.

Un pied de seigle (poacée) cultivé en pot, mesurant 56 cm de hauteur et pesant environ 200 g, possède un réseau racinaire dont la longueur totale cumulée est de 623 km. La surface d'échange cumulée entre ces racines et le sol a été évaluée à 639 m^2, soit l'équivalent de 2,5 terrains de tennis.

3 Quelques chiffres.

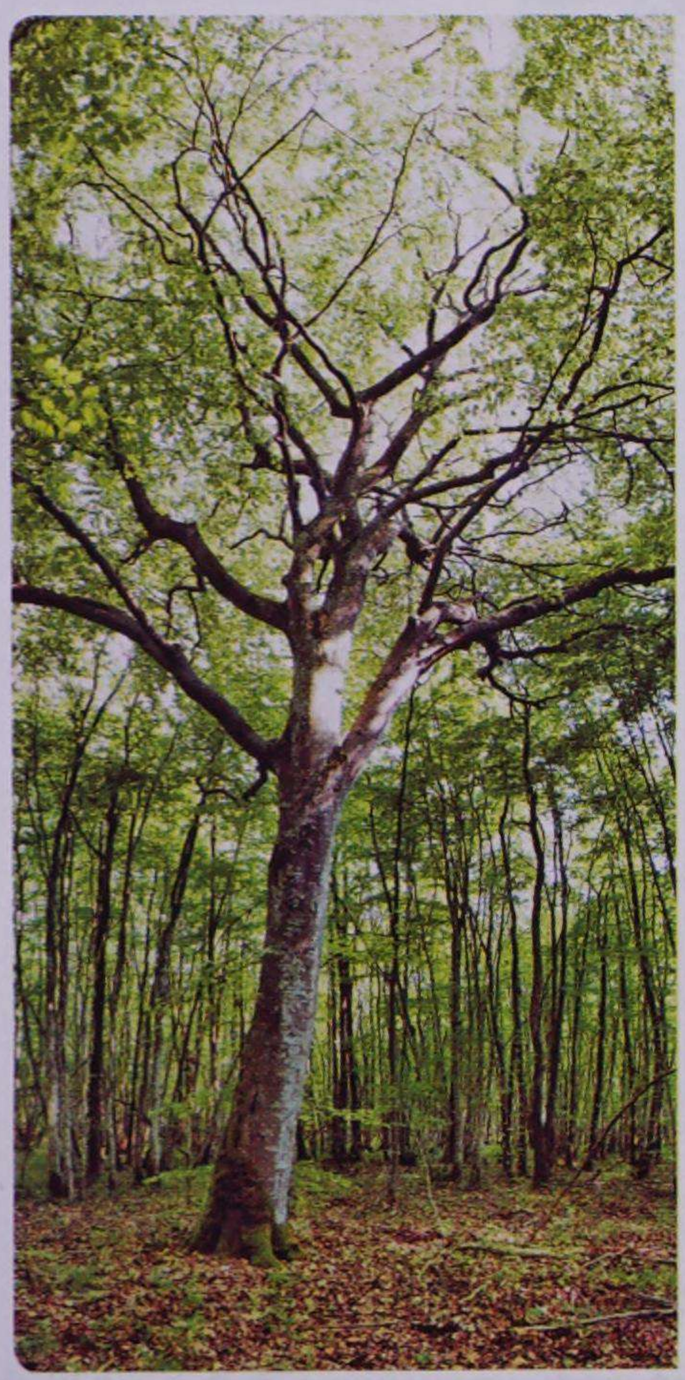


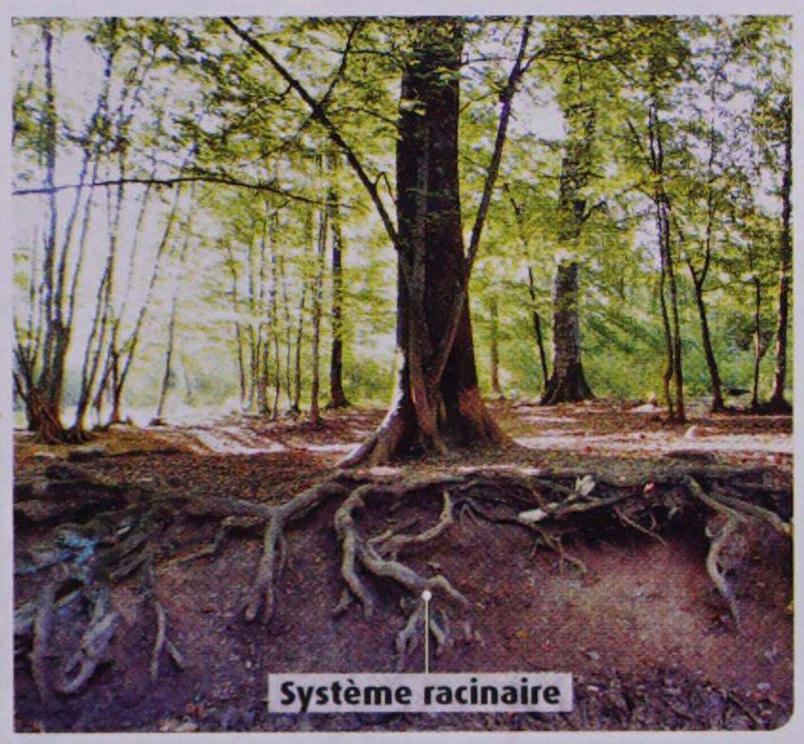
4 La morphologie du coquelicot. L'appareil aérien est constitué d'une tige chlorophyllienne dont les feuilles, très riches en cellules chlorophylliennes, assurent la synthèse de matière organique (photosynthèse). À la base de chaque feuille, un bourgeon axillaire assure la ramification de la plante. L'appareil souterrain est constitué d'un système racinaire organisé autour d'une racine principale et de racines secondaires. Cet ensemble permet l'ancrage de la plante et son alimentation en eau et en sels minéraux.

Observer les plantes à fleurs d'une forêt

SORTIE DE TERRAIN

5 Une hêtraie dans le Châtillonnais (Côte-d'Or). Dans une forêt, la végétation est répartie en trois couches ou strates verticales. La strate arborescente, dominante, est composée d'arbres (ici, des hêtres pour l'essentiel). La strate des plantes herbacées est la plus proche du sol. Entre cette dernière et la strate arborescente, on observe des arbustes, comme le noisetier (strate arbustive). Les tiges des arbres et arbustes sont rigidifiées par la présence de lignine dans la paroi de certaines cellules : ce sont des plantes ligneuses. Les arbres se distinguent par la présence d'une tige principale – le tronc – tandis que les arbustes possèdent de nombreuses tiges d'importance équivalente.





6 La morphologie du hêtre. Avec son tronc rigide dont la croissance s'effectue pendant de nombreuses années (entre 150 et 300 ans), le hêtre peut atteindre une hauteur de 30 à 40 m. Les feuilles se développent horizontalement, alors qu'un bourgeon terminal assure la croissance en longueur de chaque rameau. Des bourgeons axillaires situés à la base des feuilles permettent la ramification du tronc et des rameaux. Le hêtre possède un système racinaire superficiel, avec des racines peu enfoncées, mais étalées sous la surface du sol.

On a évalué qu'un arbre feuillu de 24 mètres de haut et d'une masse totale d'environ 1,8 tonne possédait entre 147 000 et 235 000 feuilles, qui développent une surface foliaire totale comprise entre 294 et 470 m^2.

7 Quelques chiffres.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1, 2 ET 5.** Comparez les caractéristiques des deux écosystèmes étudiés.
2. **DOC. 1, 4 ET 6.** Comparez les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles d'une plante herbacée et d'une plante ligneuse.
3. **DOC. 3, 4, 6 ET 7.** Montrez, en vous appuyant sur un schéma, que les deux types de plantes à fleurs présentent une organisation fonctionnelle commune comprenant deux surfaces d'échange dont vous préciserez le rôle concernant la nutrition de la plante.
4. **EN CONCLUSION.** Résumez les liens entre l'organisation des plantes à fleurs et leur vie fixée.

UNITÉ 2

Les échanges des plantes à fleurs avec leur milieu

Une plante à fleurs est un être vivant fixé qui se développe à l'interface entre le sol et l'atmosphère. Elle présente de vastes surfaces permettant la réalisation d'échanges avec ces deux milieux.

Comment les échanges entre une plante à fleurs et son milieu sont-ils réalisés ?

Des échanges avec l'atmosphère

TP

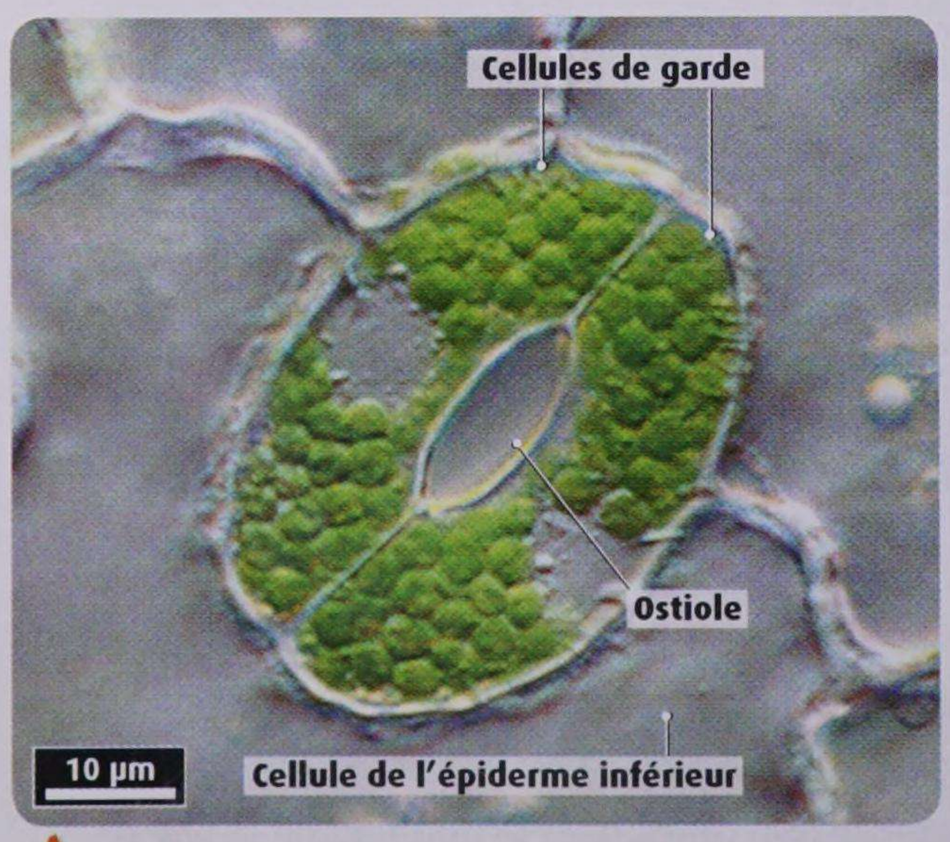
1 Coupe transversale du limbe d'une feuille d'épine vinette (vue au MO). Les feuilles sont le siège d'une perte d'eau par évaporation : c'est la transpiration foliaire. Les pertes ont lieu principalement par les stomates et par la cuticule, fine couche de cires imperméables recouvrant l'épiderme.

JE MANIPULE

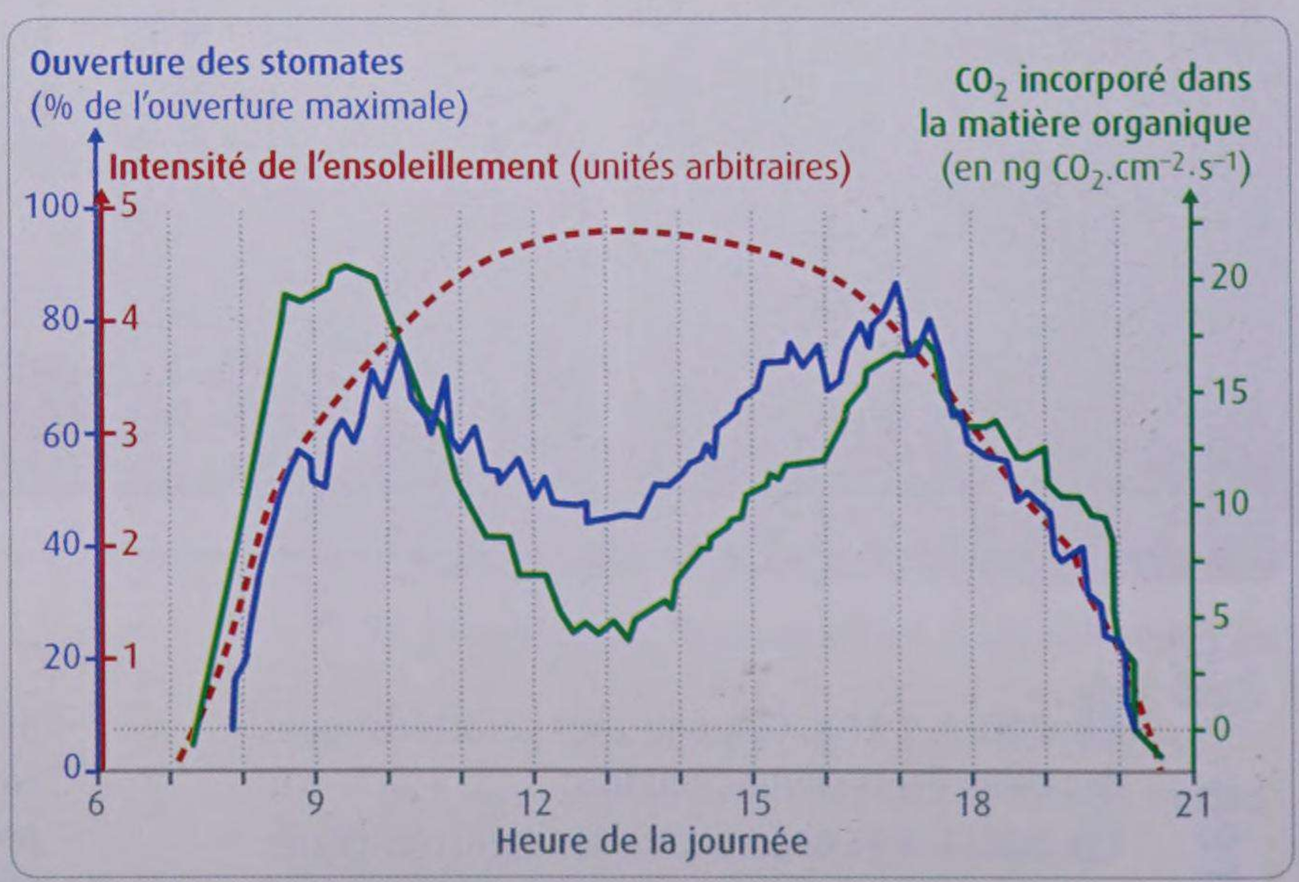
► À l'aide d'une lame de rasoir, coupez transversalement en deux le limbe d'une feuille.

► Sur la tranche d'une des moitiés obtenues, débitez de très fins copeaux.

► Montez un copeau dans une goutte d'eau entre lame et lamelle. Observez au MO.

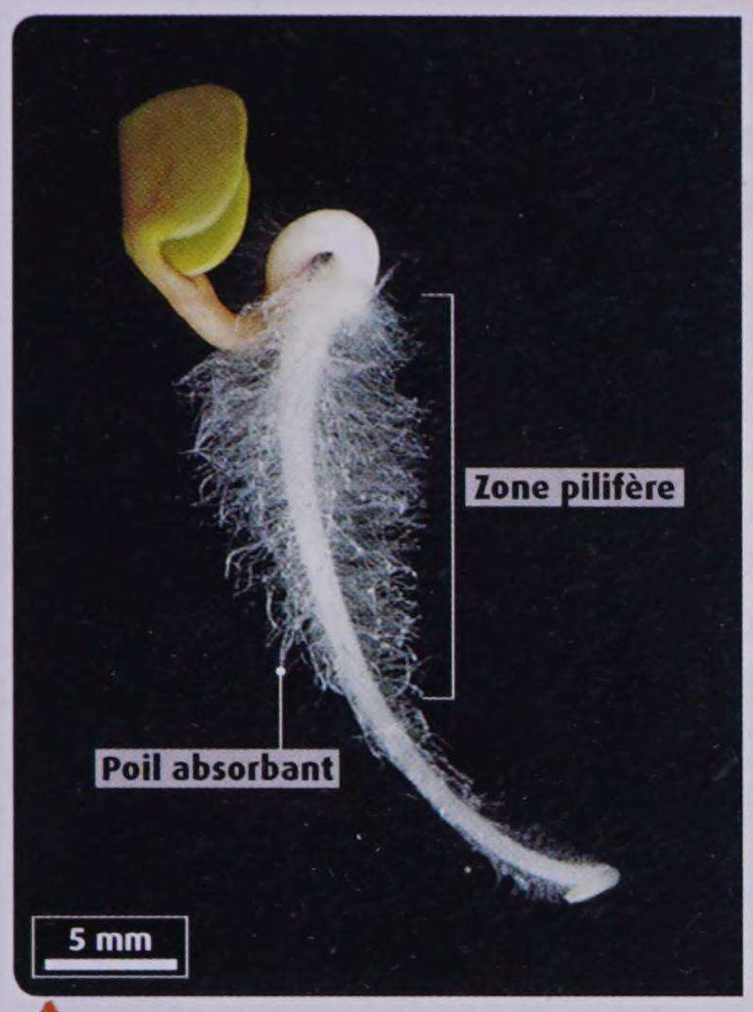


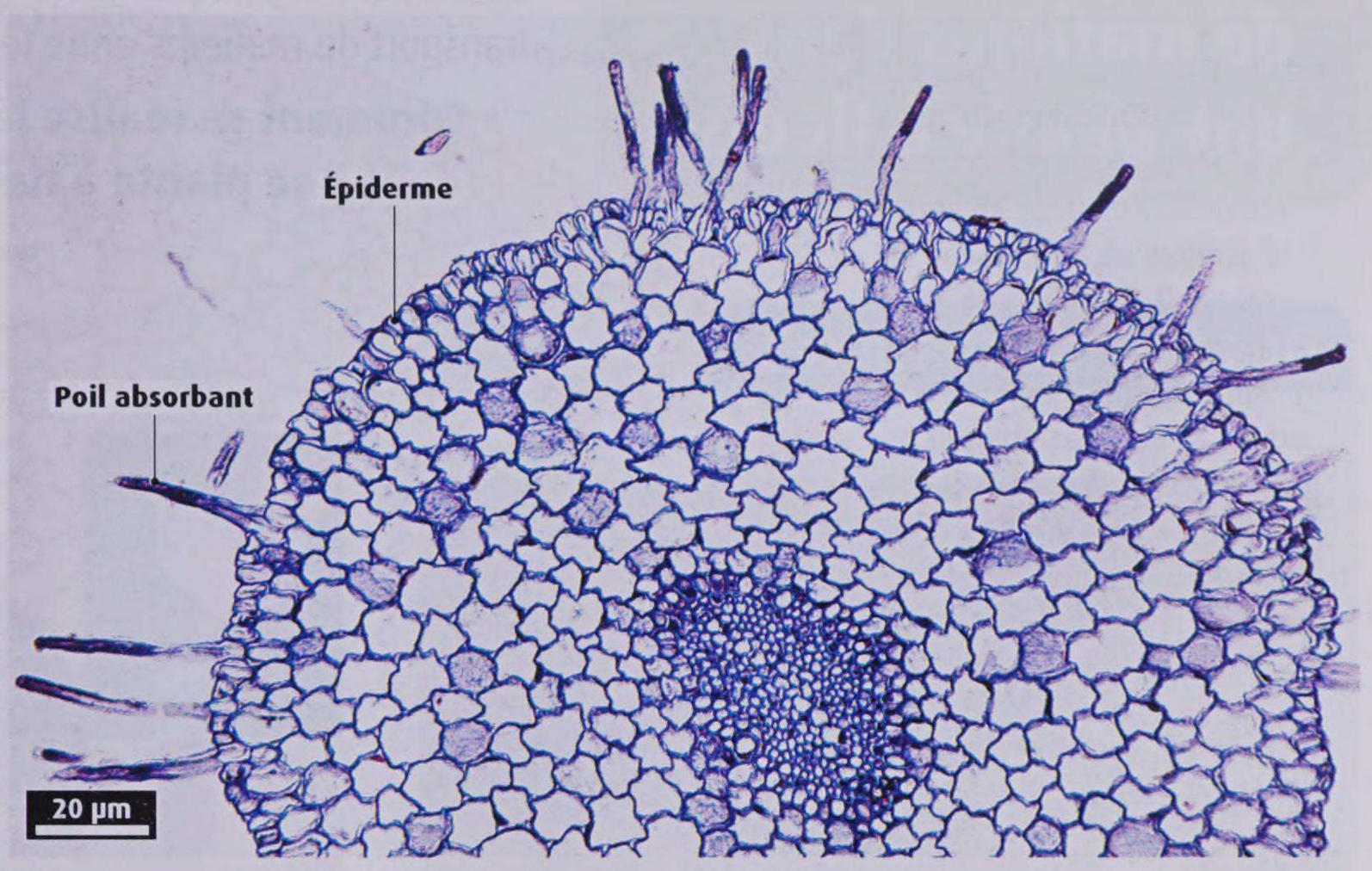
2 Un stomate dans l'épiderme d'une feuille (vu au MO). L'ostiole est un orifice de diamètre variable. Son ouverture est contrôlée par les deux cellules de garde.



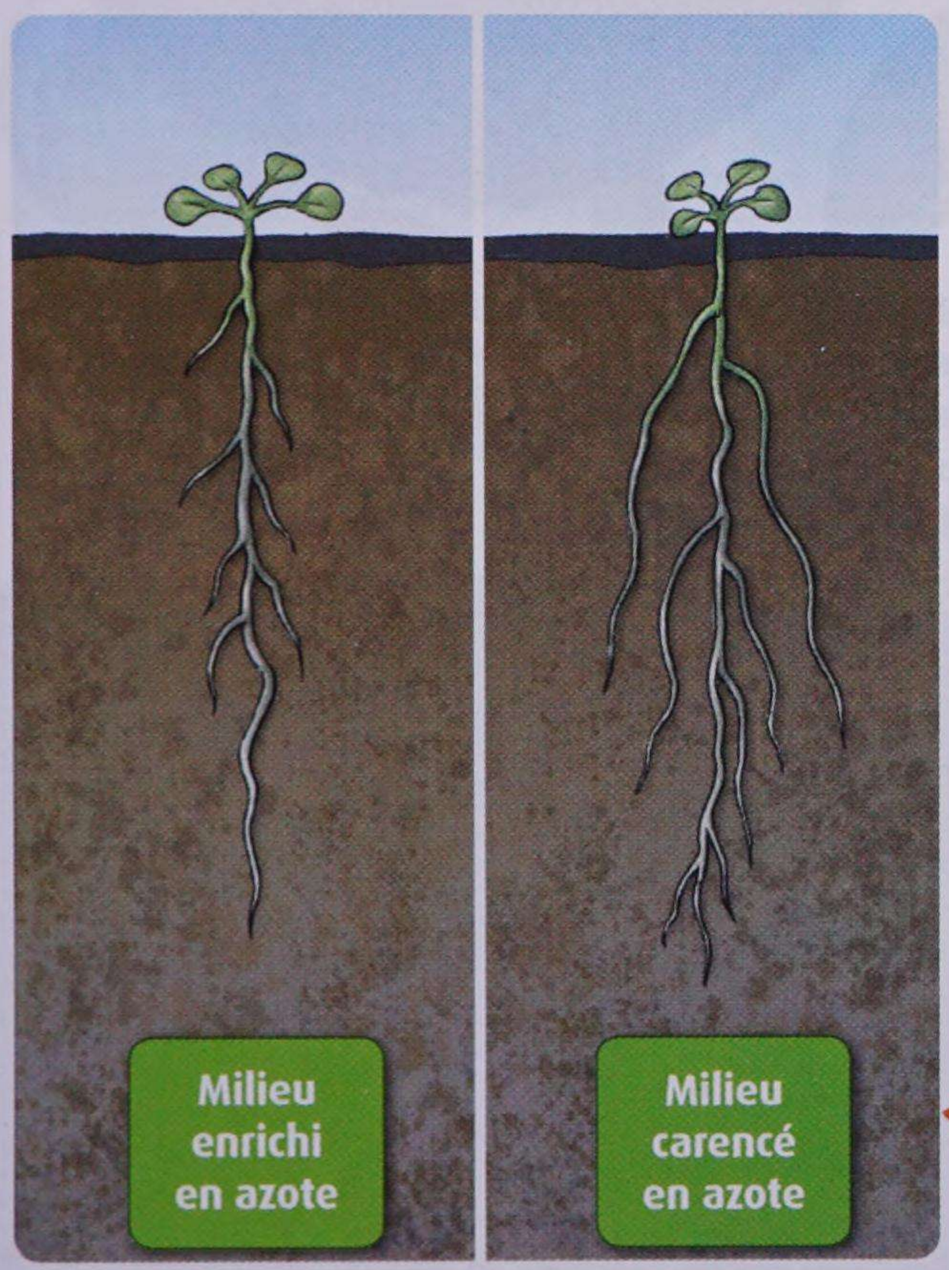
3 Les variations de l'ouverture des stomates et de l'incorporation du dioxyde de carbone chez un arbousier (plante méditerranéenne) au cours d'une journée d'été ensoleillée.

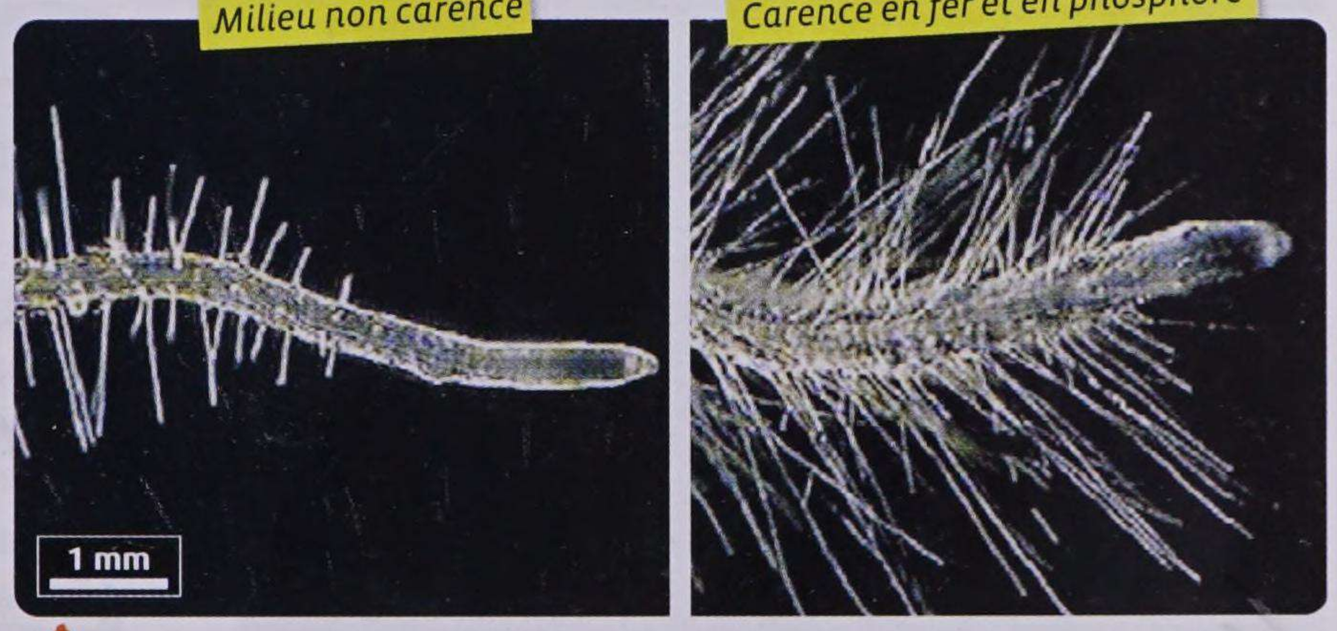
Des échanges avec le sol





4 L'appareil racinaire d'une plantule de radis : vue d'ensemble et vue en coupe transversale de la zone pilifère au MO.
Chez la majorité des plantes, les racines secondaires présentent une zone pilifère riche en poils absorbants (300 à 400 par cm^2). Les poils absorbants sont des cellules allongées de l'épiderme et représentent le principal site d'absorption de l'eau et des sels minéraux.





5 La zone pilifère de racines d'arabettes des dames placées dans deux conditions de culture (vue au MO). Les plants d'arabette ont été cultivés soit dans un milieu équilibré en éléments minéraux, soit dans un milieu carencé en fer et en phosphore.

6 Le système racinaire d'arabettes des dames placées dans deux conditions de culture. Les plants d'arabette ont été cultivés dans un milieu nutritionnel soit enrichi en azote, soit carencé en azote.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Réalisez un schéma légendé de la structure du limbe d'une feuille (en coupe) en y traçant les trajets de la lumière, du CO_2 atmosphérique et de la vapeur d'eau.
2. **DOC. 1 À 3.** Montrez que les stomates et la cuticule permettent une adaptation de la plante aux variations des conditions du milieu.
3. **DOC. 4.** Indiquez en quoi les poils absorbants constituent un dispositif efficace pour l'alimentation minérale d'une plante.
4. **DOC. 5 ET 6.** Montrez comment le système racinaire peut s'adapter aux variations des conditions du milieu.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques des structures d'échanges d'une plante avec son milieu de vie et leurs adaptations aux variations du milieu.

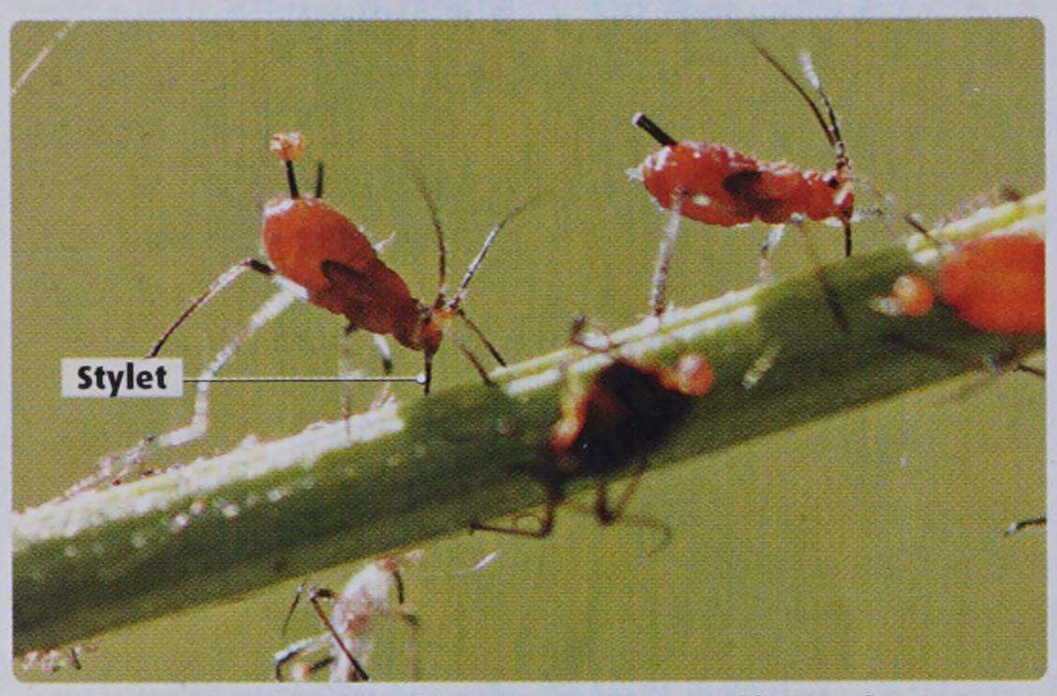
UNITÉ 3

La circulation de matières dans une plante à fleurs

L'eau et les sels minéraux sont prélevés dans le sol, au niveau des racines. Dans les feuilles, la photosynthèse permet la production de matière organique. Cette répartition des tâches implique un transport de matières entre les différents organes de la plante.

Comment se réalise la circulation des matières dans une plante à fleurs ?

Des flux de matières



Des pucerons se nourrissant sur la tige d'une plante dans laquelle ils enfoncent leur stylet. Si l'on élimine le corps de l'insecte en laissant le stylet en place, du liquide s'écoule par ce dernier : c'est la sève élaborée de la plante.

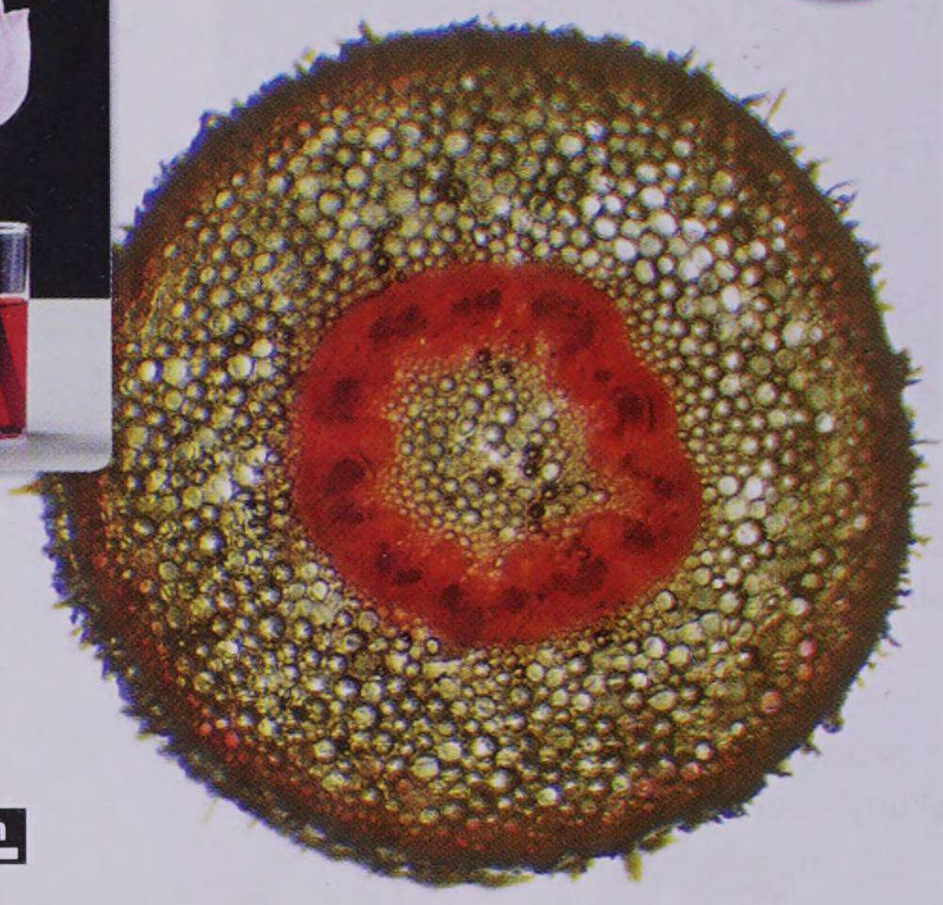
Les « pleurs de la vigne ». Après la taille de printemps, on observe un suitement de liquide au niveau des sections : c'est la sève brute.

Composants	Sève brute	Sève élaborée
Eau	99 %	80 %
Substances dissoutes... dont :	1 %	20 %
Saccharose ($mg.mL^{-1}$)	0	80
Protéines, acides aminés ($mg.mL^{-1}$)	traces	81,5
Ions minéraux ($\mu g.mL^{-1}$)	36,7	86,9

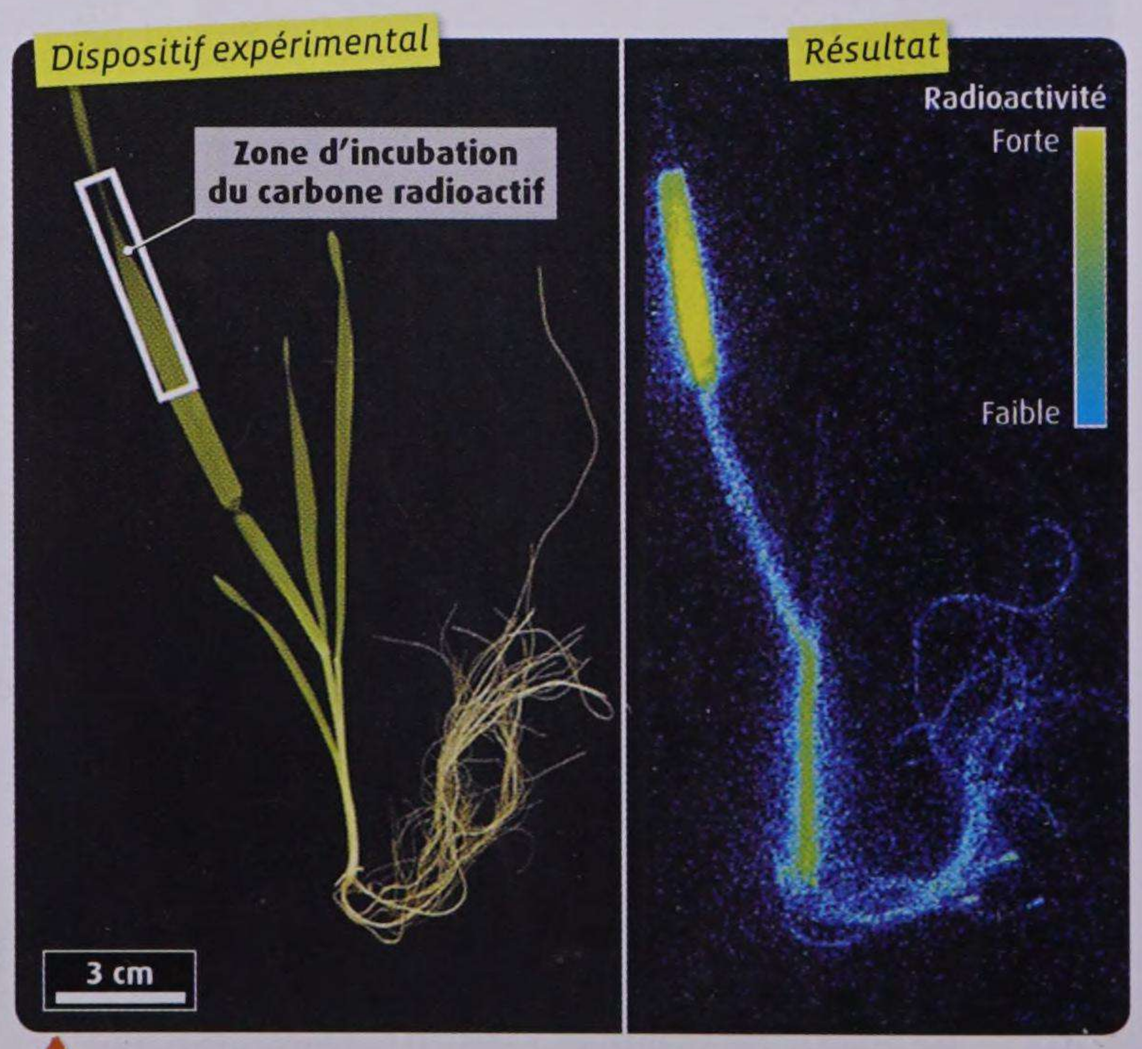
Composition moyenne de la sève brute et de la sève élaborée.

1 Deux types de sève.

TP



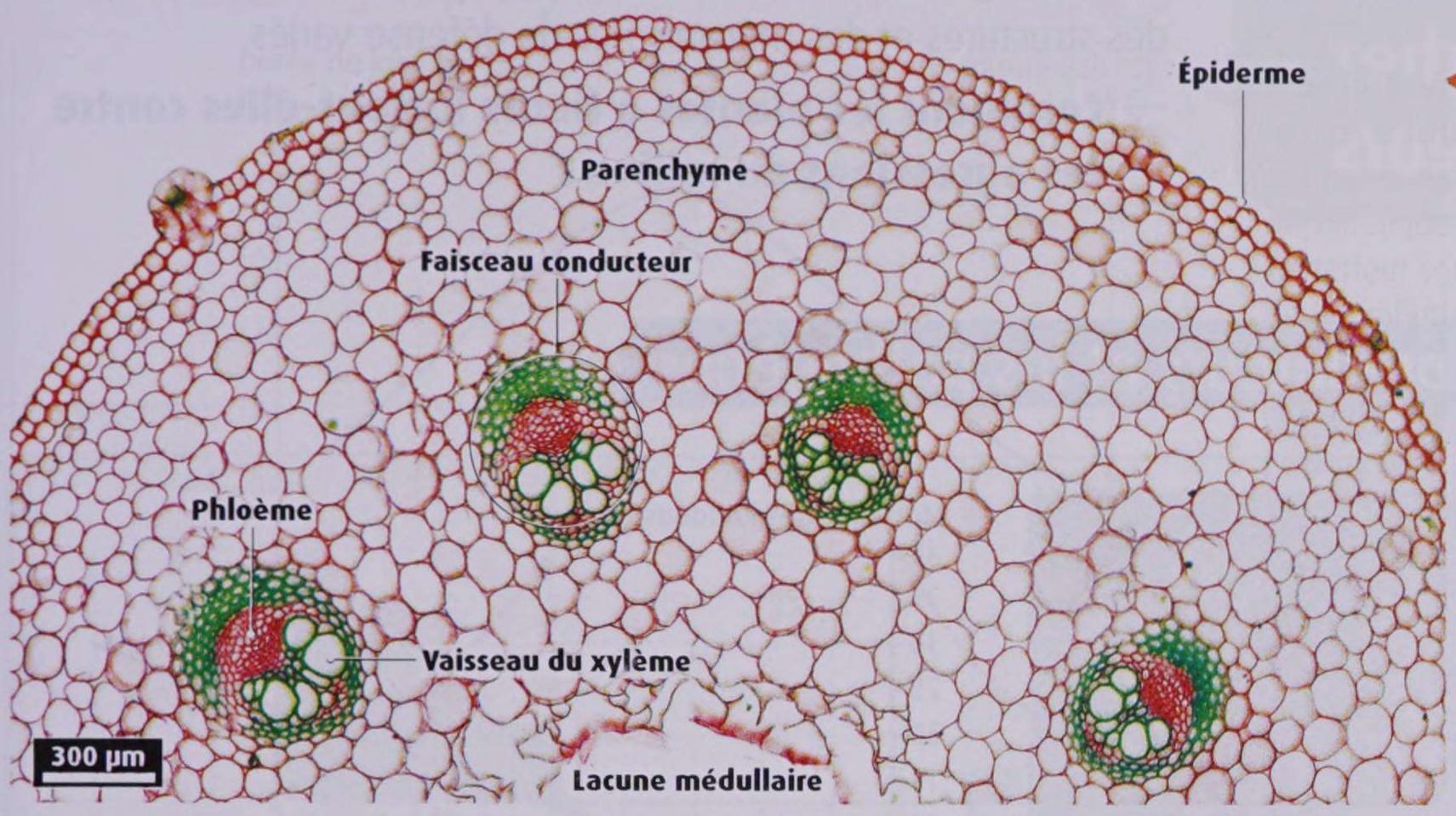
2 Coupe transversale de la tige d'un rameau d'*Impatiens* (vue au MO) plongé pendant 3 heures dans une solution de fuschine. L'expérience peut aussi être réalisée avec un rameau de cyclamen (vignette).



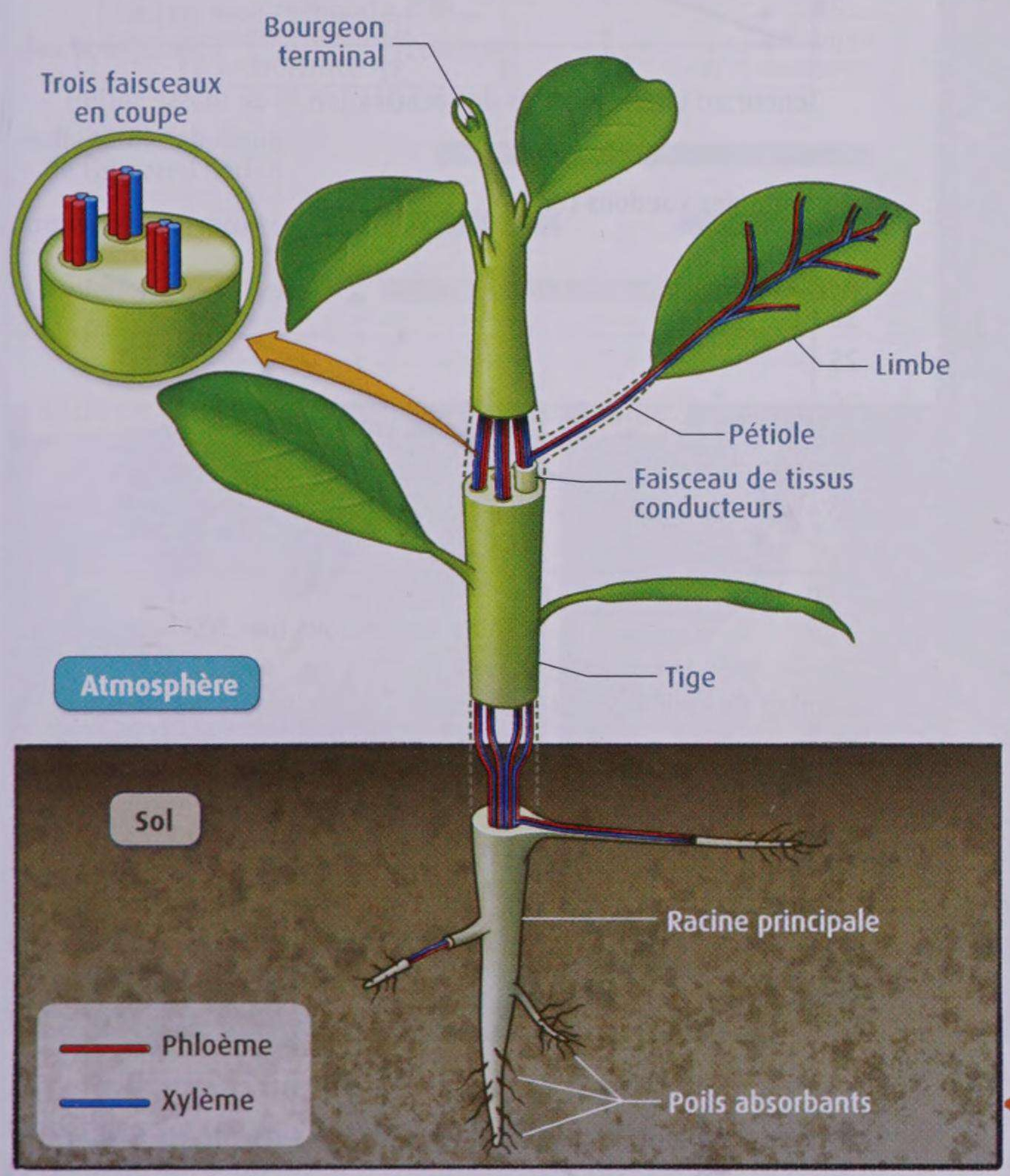
3 Le suivi des produits de la photosynthèse dans une plante. Une feuille d'un pied d'orge exposé à la lumière est placée dans une enceinte fermée dans laquelle circule de l'air enrichi en carbone radioactif. Après quelques heures, la radioactivité est localisée et quantifiée dans la plante.

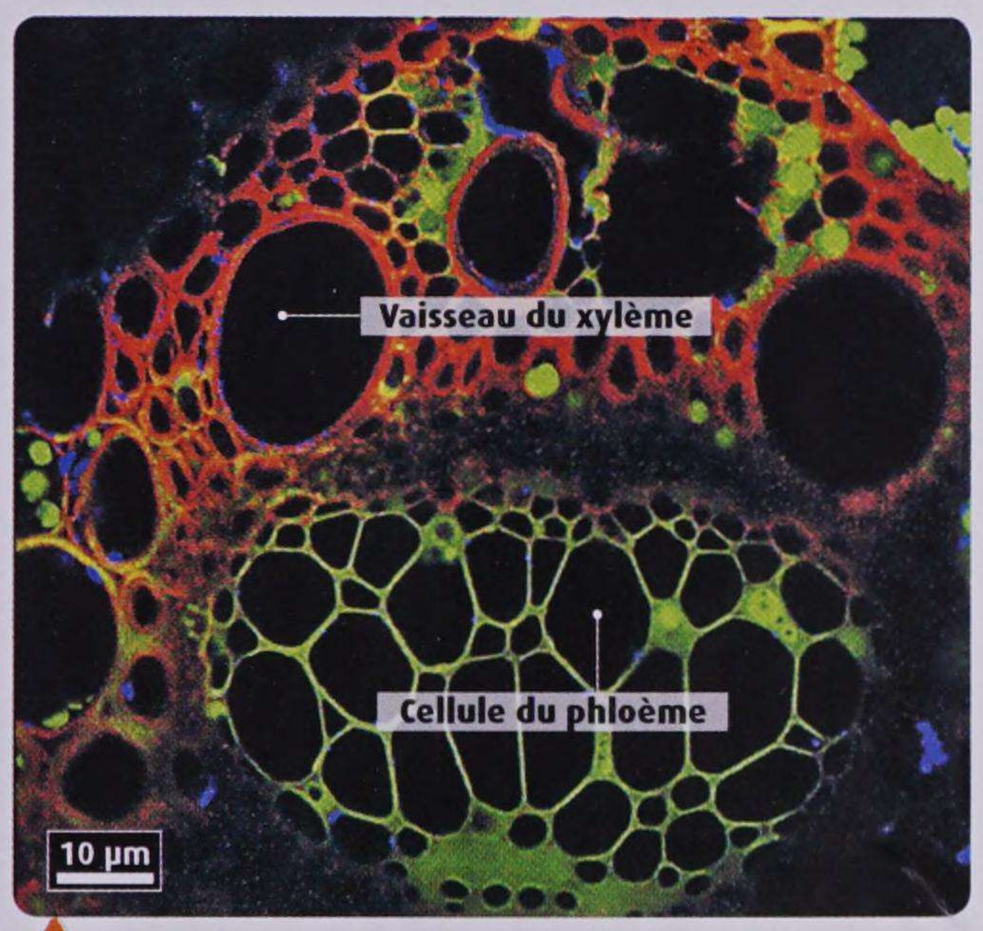
Des vaisseaux conducteurs

TP



4 Coupe transversale d'une tige de renoncule (vue au MO). On observe deux types de tissus conducteurs de sève : ceux du xylème et ceux du phloème. Dans une tige, ils sont regroupés en faisceaux. Le parenchyme est un tissu de soutien. La coupe a été colorée de manière à pouvoir différencier les tissus en fonction de leur composition chimique : les tissus riches en lignine apparaissent en vert alors que les tissus riches en cellulose sont en rose.





5 Coupe transversale au niveau d'un faisceau conducteur d'une feuille après une expérience de marquage (vue au MO). La feuille est issue d'un plant de riz qui a été exposé à deux substances fluorescentes : l'une, verte, au niveau de ses feuilles et l'autre, rouge, au niveau de ses racines. Les parois des cellules exposées aux substances fluorescentes deviennent fluorescentes.

6 L'organisation des tissus conducteurs à l'échelle de la plante.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Comparez la composition des deux types de sève. Émettez une hypothèse quant à leur origine respective.
2. **DOC. 2 ET 3.** Éprouvez votre hypothèse et qualifiez la direction du flux de matière associé à chaque type de sève.
3. **DOC. 4 À 6.** Indiquez quels sont les tissus conducteurs qui transportent chaque type de sève et précisez leur organisation à l'échelle de la plante.
4. **CONCLUSION.** Résumez les modalités de la circulation de matières dans une plante à fleurs.

UNITÉ 4

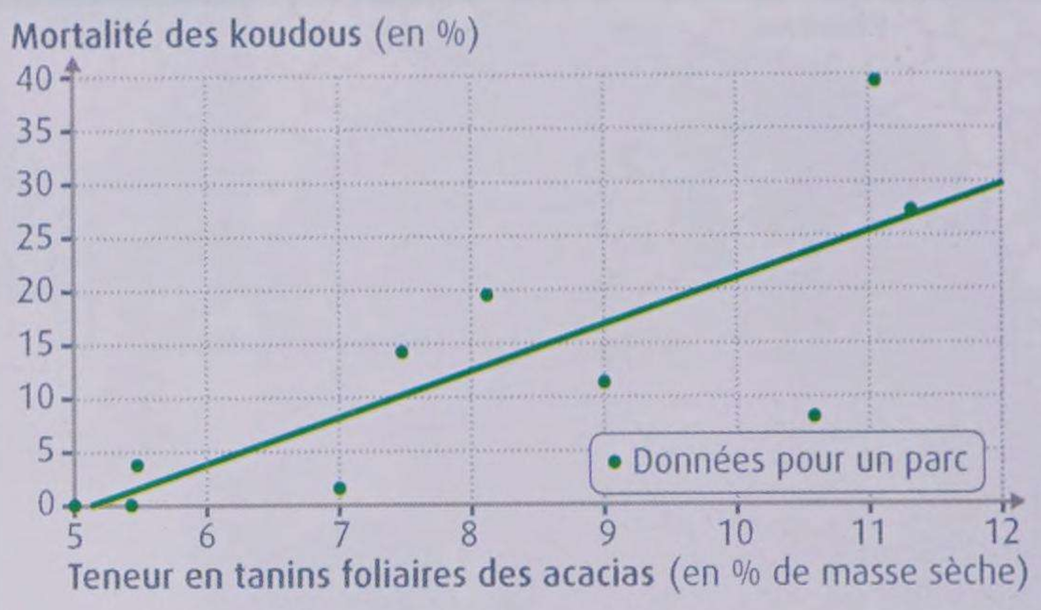
La lutte contre les agressions chez les plantes à fleurs

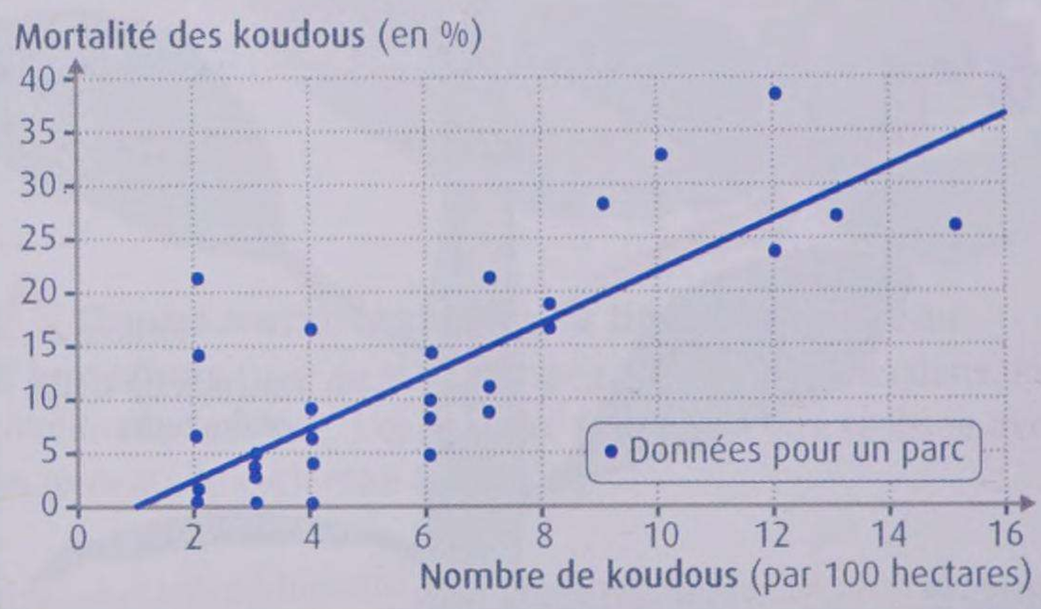
Dans leur milieu de vie, les plantes à fleurs sont soumises à diverses agressions. Elles ont développé, au fil de l'évolution, des structures et des mécanismes de défense variés.

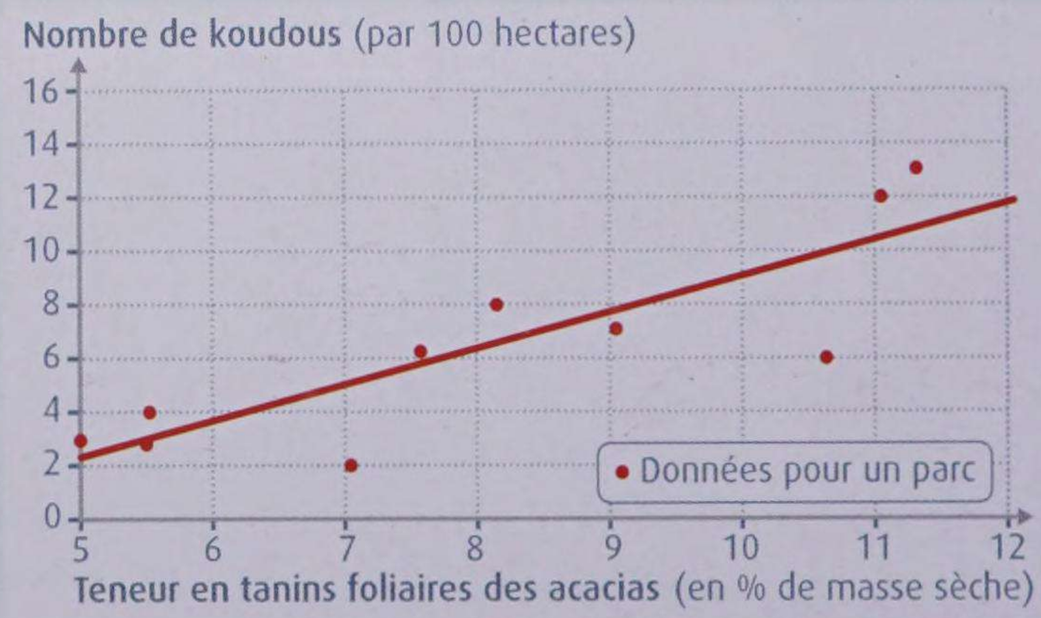
Comment les plantes à fleurs luttent-elles contre les agressions du milieu ?

La lutte contre les prédateurs et les pathogènes

1 L'étude d'un exemple : les acacias et les antilopes en Afrique du Sud. Au début des années 80, les propriétaires sud-africains constatent une forte mortalité dans les populations de koudous (une grande antilope) vivant dans leurs parcs fermés (près de 2000 cadavres recensés). Dans ces vastes enclos, les koudous se nourrissent essentiellement d'acacias, les mêmes arbres étant consommés à tour de rôle par différents koudous. Les feuilles des acacias renferment des tanins. Lorsqu'un acacia est brouté par un herbivore, on observe que la concentration en tanins dans ses feuilles augmente rapidement (+ 94 % après 15 min, + 256 % après 60 min) et que l'arbre émet de fortes quantités d'éthylène. Ce gaz volatil déclenche, chez les acacias voisins, une augmentation de la production de tanins.



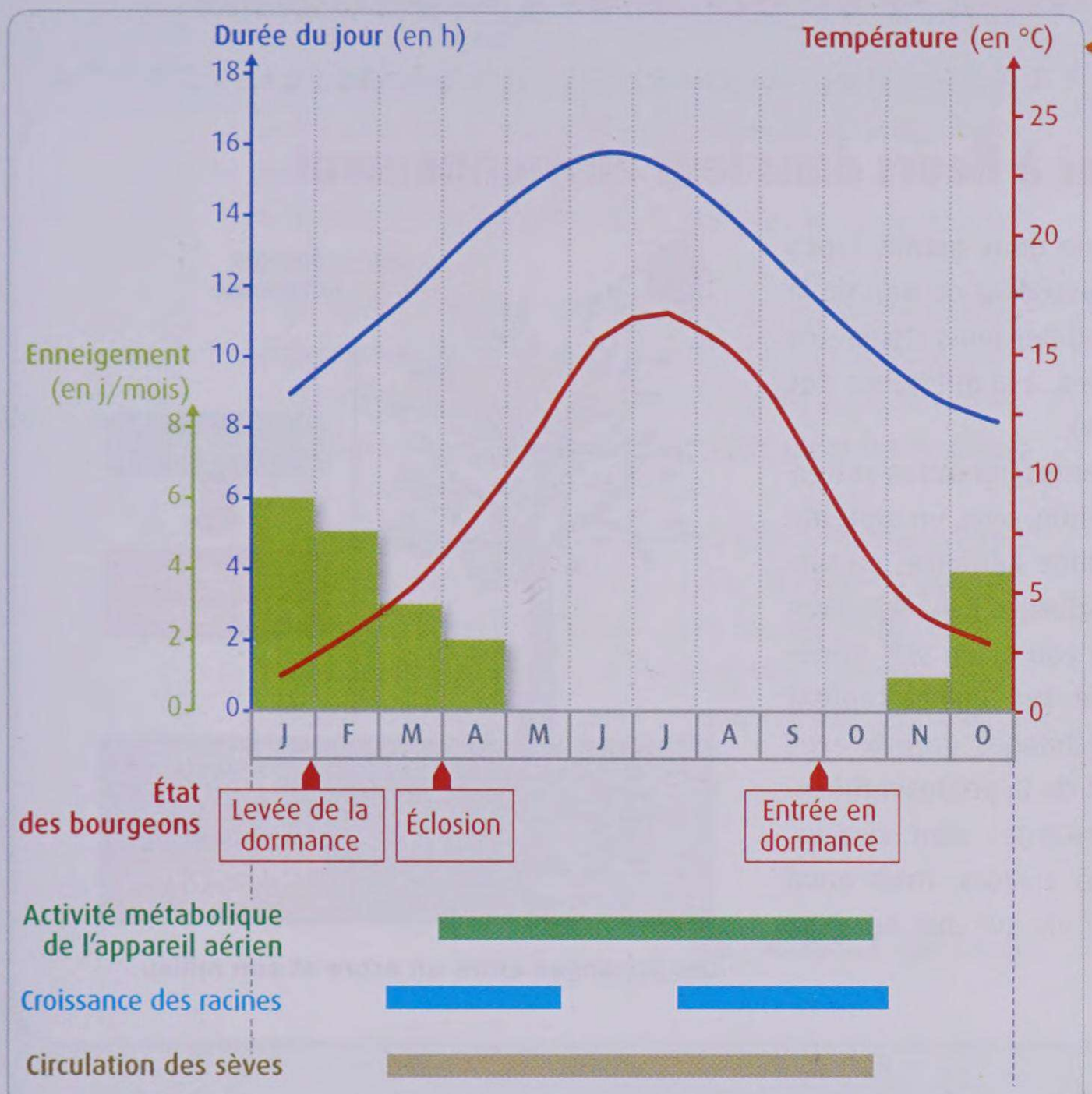




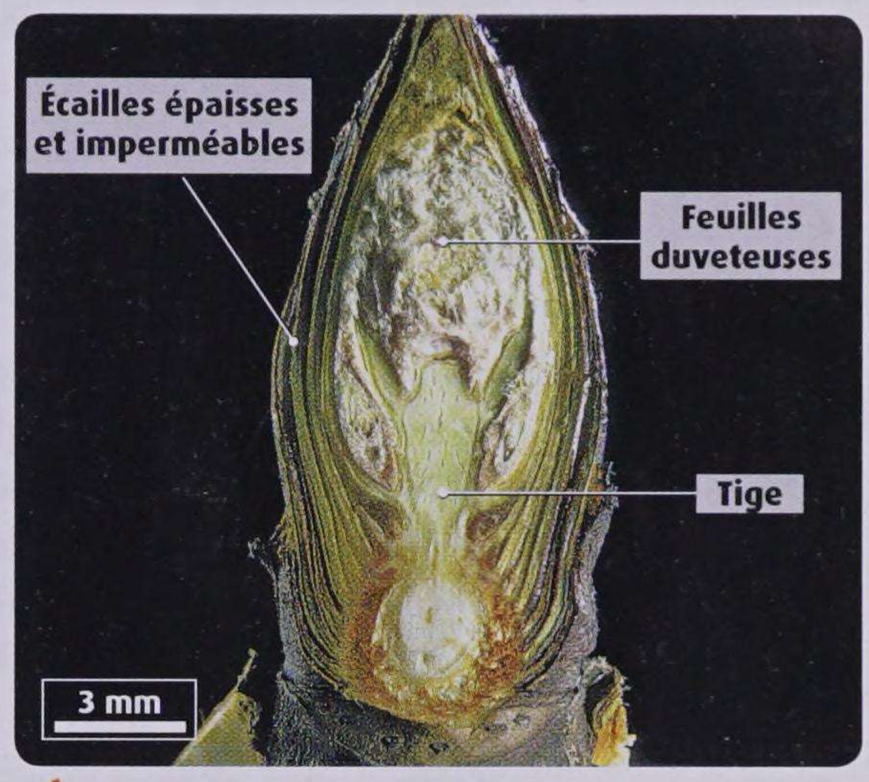
Plante	Agresseur	Moyen de défense
Lavande	Chenilles de papillons	De nombreux poils sur les feuilles rendent le limbe difficilement accessible
Peuplier	Gui (plante parasite)	La sécrétion de tanins empêche le développement du gui dans la branche
Pavot	Champignons ou bactéries pathogènes profitant d'une blessure	La sécrétion de morphine au niveau de la blessure renforce les parois des cellules végétales
Vesce des champs	Insectes et acariens herbivores	La production de nectar sur la plante attire des fourmis qui attaquent les herbivores

2 Quelques exemples d'agresseurs des plantes à fleurs et de réponse associée.

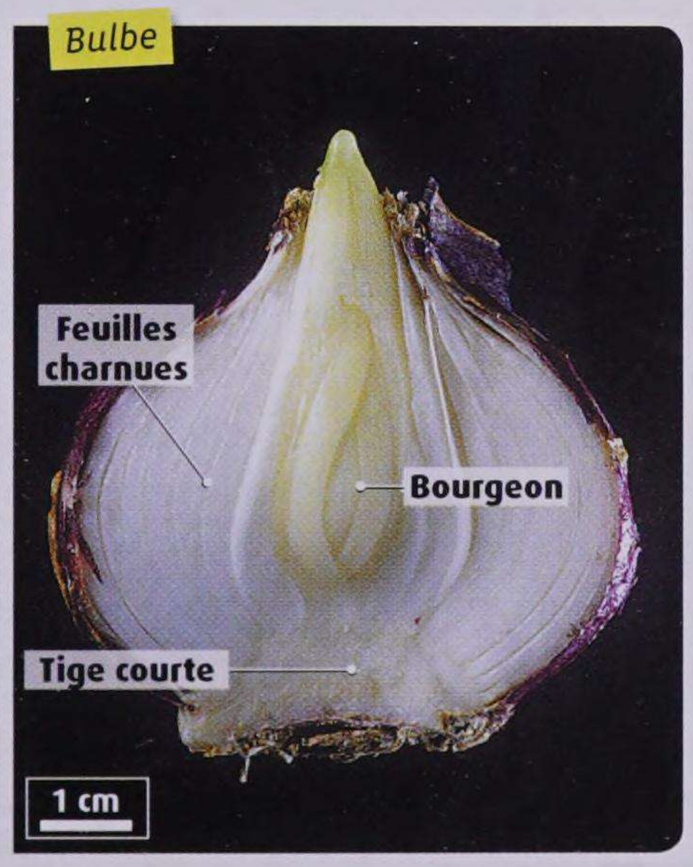
La lutte contre les variations des conditions du milieu



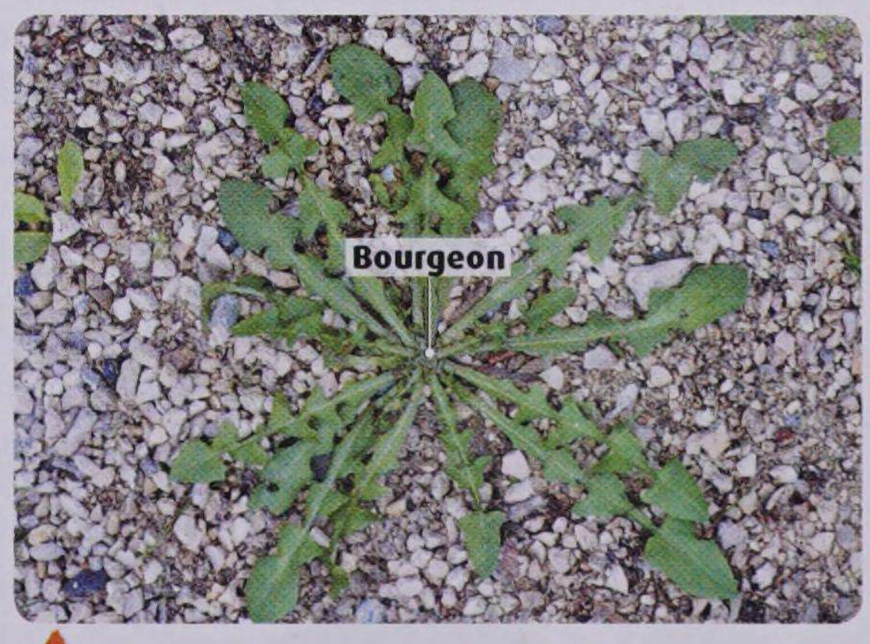
3 L'évolution des caractéristique d'un arbre à feuilles caduques au fil des saisons en Côte-d'Or. Lorsque l'activité métabolique de l'arbre et ses échanges avec l'extérieur sont fortement réduits, on dit qu'il est en vie ralentie.



4 Coupe longitudinale d'un bourgeon de marronnier au mois de décembre. Formés durant l'été, les bourgeons entrent en dormance (une forme de vie ralentie) dès l'automne. Ils n'en sortiront qu'après avoir subi une période de froid marqué : c'est la levée de dormance. L'éclosion des bourgeons (ou débourrement) se fait ainsi au printemps.



5 Rhizome d'un iris et bulbe de jacinthe. Rhizome et bulbe sont deux tiges souterraines pourvues de bourgeons. Les parties aériennes de l'iris et de la jacinthe meurent à l'approche de l'hiver.



6 Un crépide en terre. Les feuilles sont persistantes. Au ras du sol, le bourgeon peut être protégé par la litière.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Reconstituez un scénario de l'enchaînement des faits ayant conduit à la surmortalité des koudous constatée dans les parcs sud-africains.

2 **DOC. 1 ET 2.** Proposez une classification des différentes stratégies de défense contre les agresseurs développées par les plantes à fleurs.

3 **DOC. 3 ET 4.** Décrivez les adaptations de l'arbre au passage de la mauvaise saison.

4 **DOC. 3 À 6.** Indiquez quels éléments communs se retrouvent dans les adaptations au passage de la mauvaise saison des plantes à fleurs présentées.

5 **CONCLUSION.** Résumez les différents types de modalités de lutte contre les agressions du milieu observées chez les plantes à fleurs.

BILAN DES UNITÉS

CHAPITRE 1

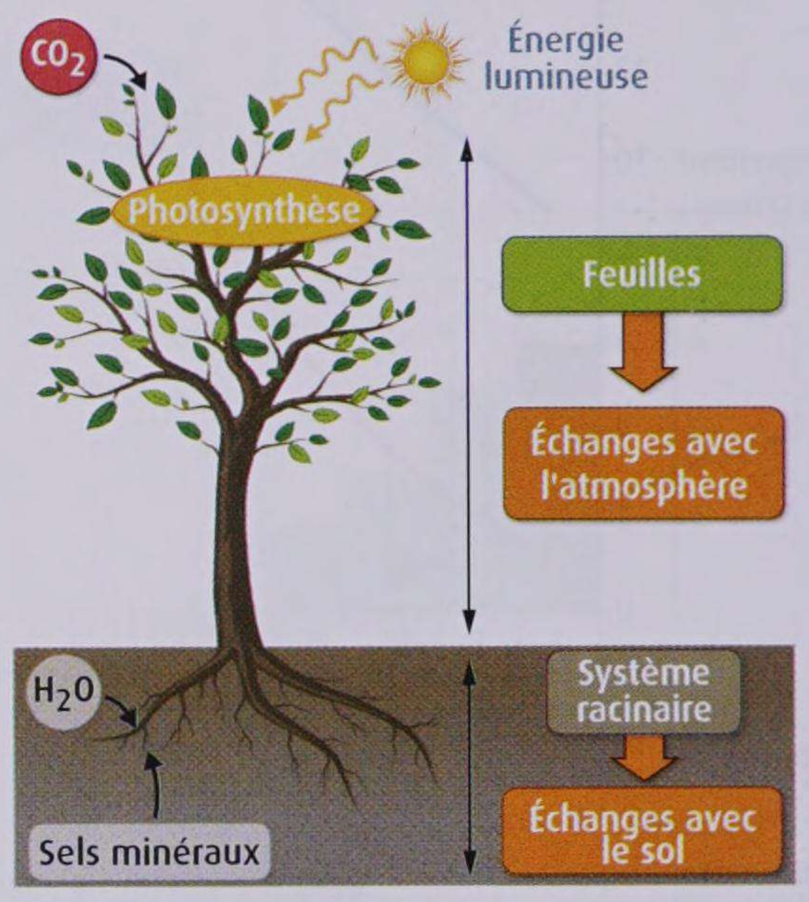
Organisation des plantes à fleurs et vie fixée

UNITÉ 1 Les plantes à fleurs dans leur environnement

• Dans les écosystèmes, on distingue deux grands types de plantes à fleurs, selon qu'elles possèdent ou non de la lignine, molécule qui permet de rigidifier leurs tissus : les plantes herbacées en sont dépourvues, à la différence des plantes ligneuses (arbustes et arbres).

• Malgré leur différence de taille, plantes ligneuses et herbacées possèdent la même organisation, avec un système racinaire souterrain et une tige feuillée aérienne. Le système racinaire offre une grande surface d'échange avec le sol, permettant l'alimentation en eau et en sels minéraux, ainsi que l'ancrage de la plante. Les feuilles captent l'énergie lumineuse, assurent les échanges gazeux avec l'atmosphère et sont le lieu principal de la photosynthèse.

• Les plantes arbustives et arborescentes sont vivaces. Les plantes herbacées peuvent être vivaces, mais aussi annuelles ou bisannuelles (cycle de vie sur une ou deux années seulement).



Les échanges entre un arbre et son milieu.

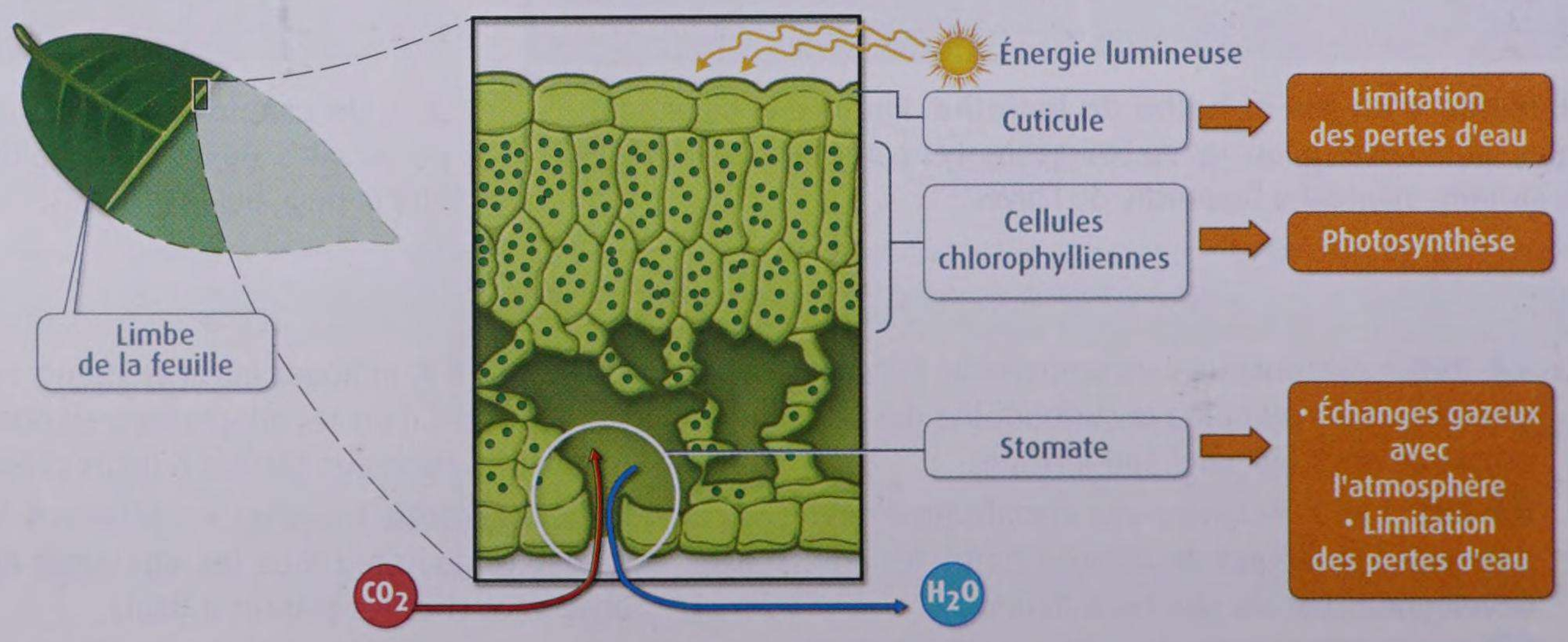
UNITÉ 2 Les échanges des plantes à fleurs avec leur milieu

• Les plantes à fleurs ont développé des systèmes d'échange avec l'atmosphère et le sol. Outre leur surface importante, ceux-ci présentent une organisation fonctionnelle particulière.

• Le limbe des feuilles possède sur sa face inférieure, des stomates qui permettent l'entrée du CO_2 atmosphérique, nécessaire à la photosynthèse. Celle-ci se réalise dans les cellules chlorophylliennes, très denses dans la partie supérieure du limbe, fortement éclairée.

• L'extrémité des racines est couverte de poils absorbants, cellules allongées qui plongent dans le sol et y prélèvent l'eau et les sels minéraux qui sont indispensables à la réalisation de la photosynthèse.

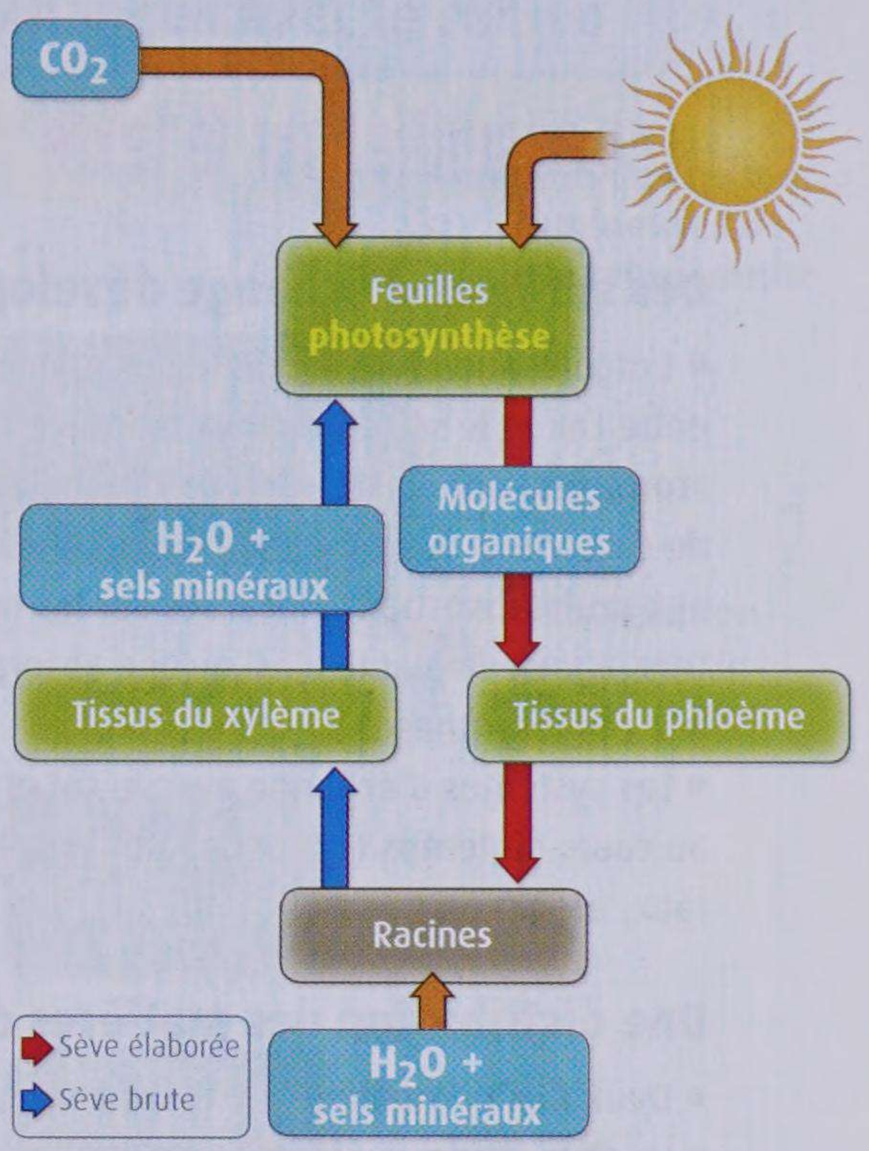
• Ces systèmes d'échanges s'adaptent aux variations du milieu. Les stomates ne s'ouvrent qu'à la lumière et si la température n'est pas excessive, limitant ainsi les pertes d'eau. La densité et la longueur des poils absorbants, ainsi que la ramification des racines peuvent augmenter en cas de carence minérale dans le sol.



Les échanges entre une feuille et l'atmosphère.

UNITÉ 3 La circulation de matières dans une plante à fleurs

- Les matières prélevées dans le milieu extérieur grâce à des structures spécialisées permettent d'assurer l'alimentation de la plante.
- Elles sont distribuées dans l'ensemble de la plante sous forme :
– de sève brute (ou ascendante), qui est une solution diluée d'eau et de sels minéraux absorbés dans le sol ;
– de sève élaborée (ou descendante), qui contient les molécules organiques fabriquées dans les feuilles grâce à la photosynthèse.
- Le transport des sèves dans la plante se fait par deux réseaux de tissus conducteurs : tissus du xylème pour la sève brute, tissus du phloème pour la sève élaborée.
- Les tissus du xylème et du phloème forment deux réseaux continus dans toute la plante, entre les racines et les feuilles.



La circulation des sèves.

UNITÉ 4 La lutte contre les agressions chez les plantes à fleurs

- En relation avec leur vie fixée, les plantes à fleurs ont développé des mécanismes de défense contre les agressions du milieu.
- La lutte contre les organismes prédateurs ou pathogènes se fait par des défenses morpho-anatomiques ou chimiques. Ces défenses peuvent être constitutives (présentes naturellement dans la plante) ou induites (intensification de la défense en cas d'attaque par un animal prédateur). Certaines plantes développent aussi des mécanismes de défense indirecte, en attirant des prédateurs des herbivores.
- Les plantes font face aux variations des conditions du milieu en calquant leur activité biologique sur les saisons. Ainsi, en automne, l'arbre entre en vie ralentie : activité métabolique et échanges avec le milieu sont réduits. Des organes spécialisés assurent aussi le passage de la mauvaise saison. C'est le cas des bourgeons, qui passent l'hiver en vie ralentie, protégés par des écailles ou par leur localisation (au ras du sol ou sur des tiges souterraines).

Mécanisme de défense	Exemple	Type de défense
Protection des feuilles	Présence de poils, d'épines, d'une cuticule épaisse	Morpho-anatomique constitutif
Feuilles riches en molécules toxiques ou répulsives	Présence de tanins	Chimique constitutif
Émission de signaux d'alerte	Chez l'acacia, l'émission d'éthylène par une feuille broutée induit une augmentation de la teneur en tanins des feuilles des arbres voisins	Chimique induit

Quelques exemples de défenses des plantes contre les prédateurs.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 1

Organisation des plantes à fleurs et vie fixée

L'essentiel par le texte

Des surfaces d'échange développées et adaptables

• L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs est liée aux exigences de leur mode de vie fixée, à l'interface entre l'air et le sol. La partie aérienne est le siège de la photosynthèse. Elle constitue, grâce aux feuilles et à leurs **stomates**, une vaste **surface d'échange** avec l'atmosphère. Elle assure efficacement l'absorption de dioxyde de carbone et le captage de la lumière indispensables à la photosynthèse. La partie souterraine constitue, grâce aux **poils absorbants** localisés sur les racines secondaires, une vaste surface d'échange avec le sol. Elle permet l'ancrage de la plante ainsi qu'une absorption efficace d'eau et d'ions minéraux du sol, également indispensables à la photosynthèse.

• Les systèmes d'échange avec le sol et l'atmosphère peuvent s'adapter aux variations qui affectent ces milieux au cours du temps (variations de l'ensoleillement, de la température de l'air, de la teneur du sol en sels minéraux, etc.).

Une distribution des matières dans toute la plante

• Deux flux de matières circulent dans la plante dans deux réseaux distincts de vaisseaux conducteurs.

• La **sève brute**, qui est une solution très diluée d'eau et de sels minéraux absorbés dans le sol, circule de façon ascendante (de l'appareil souterrain vers l'appareil aérien) dans les vaisseaux du **xylème**.

• La **sève élaborée**, qui est une solution enrichie en molécules organiques produites au niveau de l'appareil aérien grâce à la photosynthèse, circule de façon descendante (de l'appareil aérien vers l'appareil souterrain) dans le **phloème**.

Une adaptation aux agressions et aux variations du milieu

• Au fil de l'évolution, une grande variété de systèmes de défense contre les agression du milieu se sont mis en place chez les plantes à fleurs.

• Il s'agit à la fois de moyen de défense contre les pathogènes et les prédateurs (épines, poils, molécules toxiques, etc.) et de mécanismes d'adaptation aux variations saisonnières du milieu (bourgeons, chute des feuilles et vie ralentie en hiver, etc.).

Les capacités et attitudes

▸ Conduire une étude morphologique d'une plante herbacée et d'un arbre **(unité 1)**

▸ Réaliser et observer une coupe anatomique de feuille ; représenter schématiquement son organisation fonctionnelle **(unité 2)**

▸ Réaliser et observer une coupe anatomique de tige **(unité 3)**

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations sur l'organisation fonctionnelle des systèmes de distribution de matières dans la plante et sur les mécanismes protecteurs d'une plante et ses adaptations aux variations saisonnières **(unités 3 et 4)**

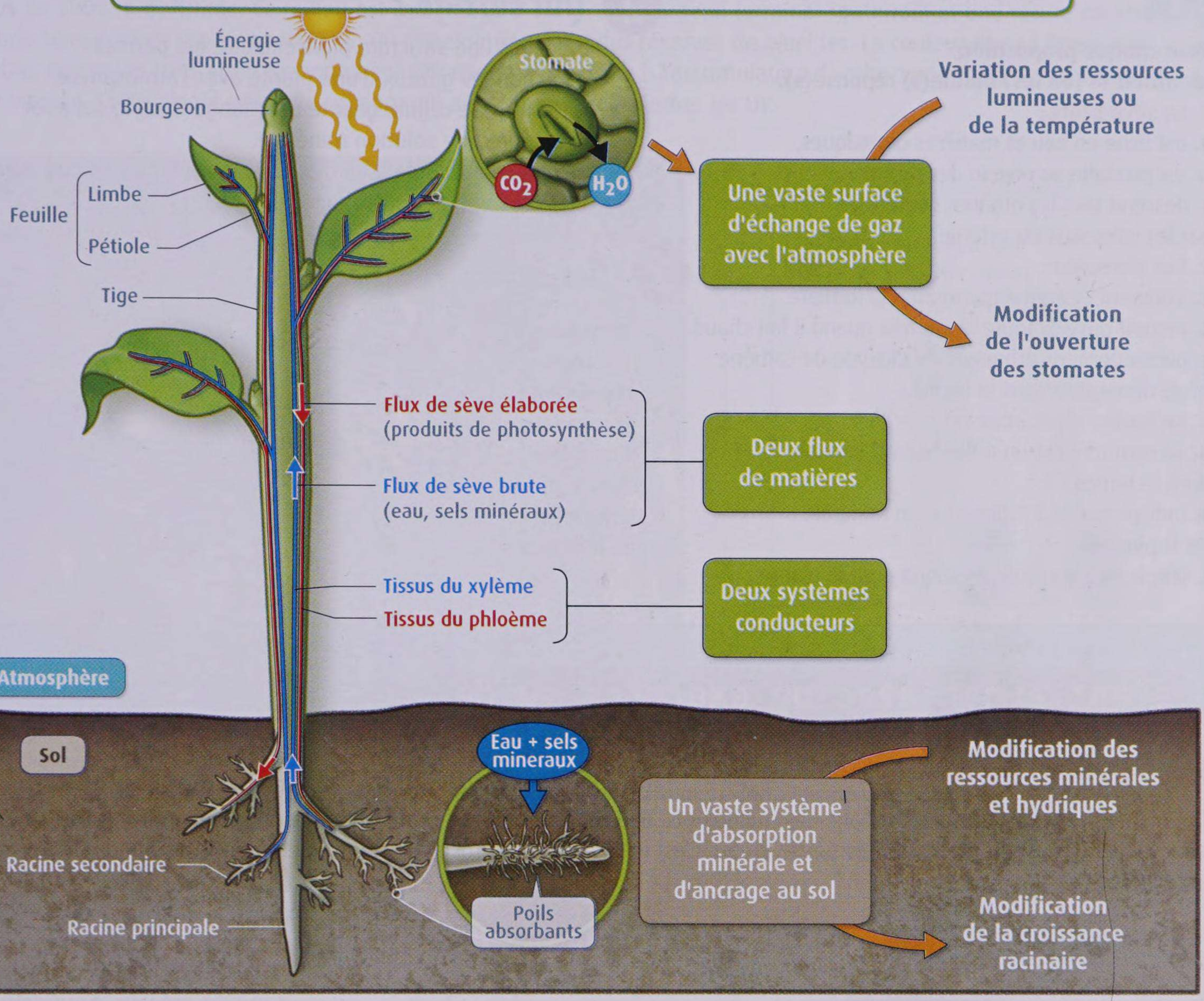
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Phloème : ensemble des structures de conduction de la sève élaborée.
Poil absorbant : cellule allongée de l'épiderme des racines secondaires, qui assure l'absorption d'eau et d'ions minéraux dans le sol.
Sève brute : liquide riche en eau et en ions minéraux puisés dans le sol (= sève ascendante).
Sève élaborée : liquide riche en eau et en matières organiques fabriquées dans les feuilles (= sève descendante).
Stomate : organe d'échange de gaz entre la feuille et l'atmosphère, inclus généralement dans l'épiderme inférieur des feuilles.
Surface d'échange : surface des organes permettant des échanges avec le milieu extérieur.
Xylème : ensemble des vaisseaux de conduction de la sève brute.

L'essentiel par l'image

Organisation des plantes à fleurs et échanges avec le milieu



Des mécanismes de défense

Défense contre les prédateurs

- Défenses mécaniques (épines, poils)

- Défenses chimiques (molécules toxiques, signaux d'alerte)

Défense contre les variations saisonnières du milieu

- Modification de l'activité métabolique (dormance des bourgeons, chute des feuilles en hiver)
- Protection des bourgeons en hiver

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La sève brute :

a. est riche en eau et matières organiques.
b. est produite au niveau des racines.
c. descend vers les organes souterrains par les vaisseaux du xylème.

2. Les stomates :

a. s'ouvrent systématiquement à la lumière.
b. restent ouverts toute la journée quand il fait chaud.
c. permettent les échanges de dioxyde de carbone et de dioxygène dans la feuille.

3. La feuille d'un arbre est :

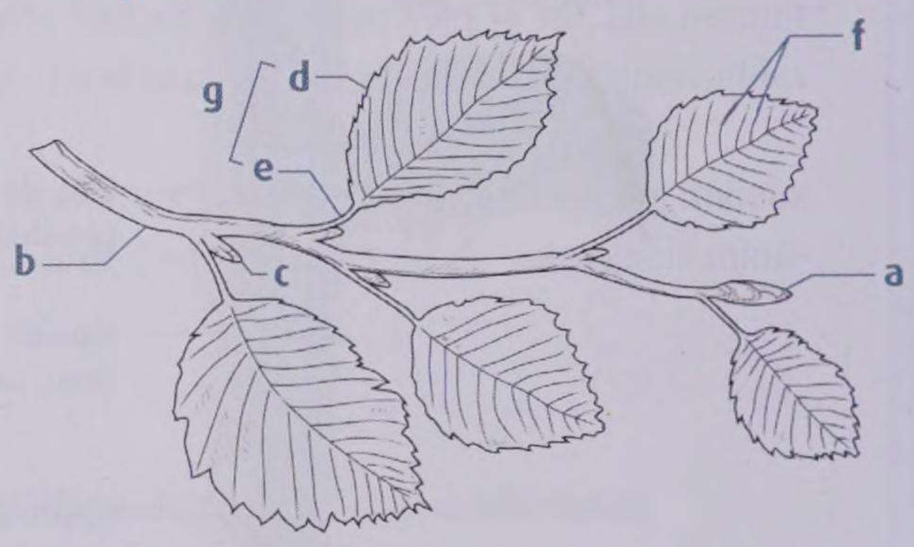
a. en contact avec un milieu de vie variable dans le temps.
b. indispensable à l'alimentation minérale de la plante.
c. une source de déshydratation pour la plante.

2 Qui suis-je ?

a. Je suis une structure pluricellulaire qui permet les échanges gazeux d'une plante avec l'atmosphère.
b. Je suis une cellule géante qui plonge dans le sol pour en extraire une solution minérale.
c. Je suis un tube de gros diamètre, permettant la migration d'une solution minérale dans la plante.

3 Schéma à compléter

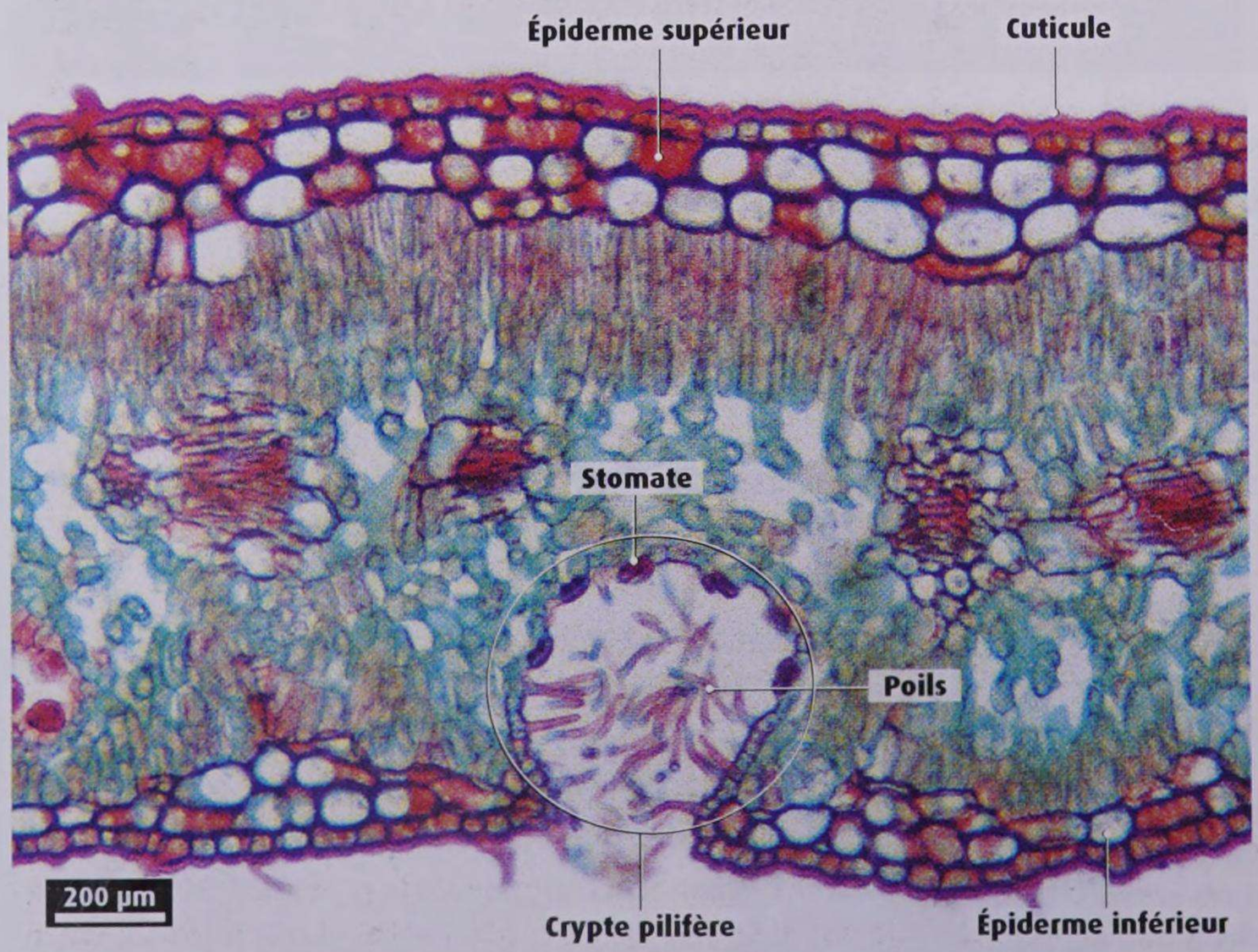
Le schéma ci-contre représente le rameau d'un arbre, l'aulne blanc. Complétez ses légendes.



s'entraîner avec un exercice guidé

4 Une plante de milieu sec : le laurier rose

Les plantes capables de survivre dans des milieux où l'eau est une ressource rare ont développé des mécanismes adaptatifs permettant de limiter les pertes d'eau. C'est le cas du laurier rose, plante fréquente dans les oueds (rivières asséchées) d'Afrique du Nord.



1. Coupe transversale du limbe d'une feuille de laurier rose.

Un peu d'aide

• Saisir des informations
– Identifiez les différentes structures d'échange observables sur cette coupe.
– Décrivez leurs particularités morphologiques.

• Mobiliser ses connaissances
Rappelez les deux modalités de déshydratation de la feuille.

• Mettre en relation des informations
Expliquez comment les particularités observées peuvent permettre de limiter la déshydratation de la plante.

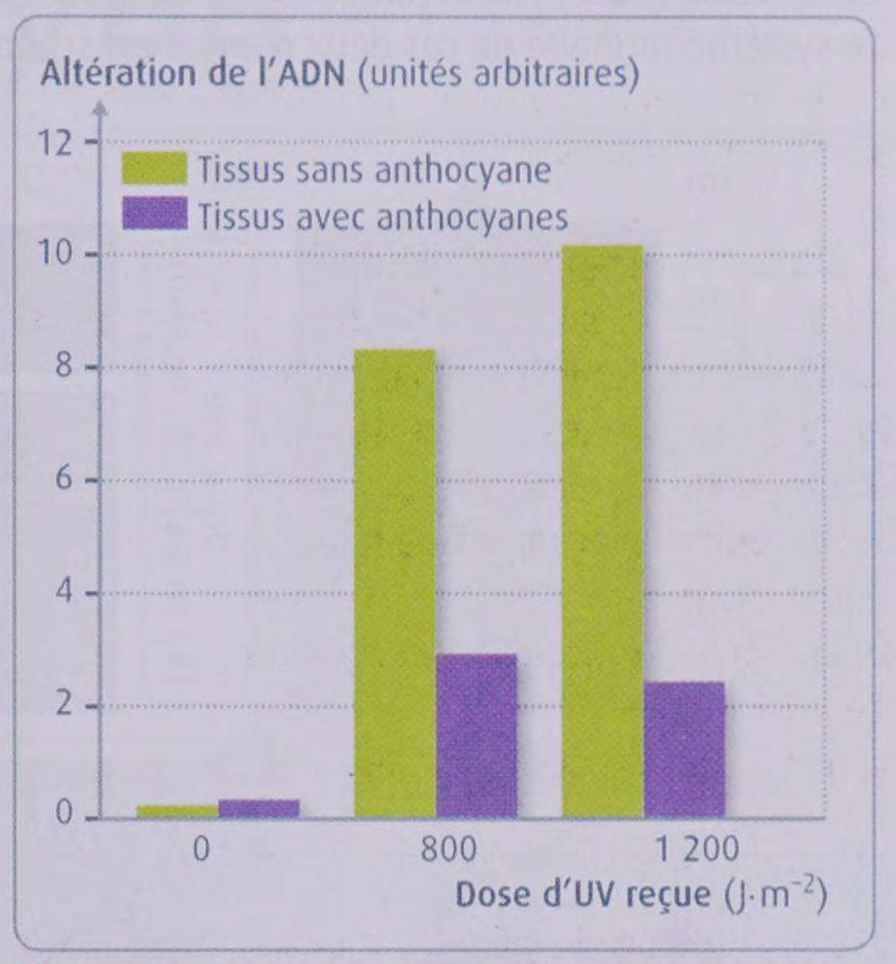
QUESTION Montrez que l'organisation de la feuille du laurier rose permet de limiter les pertes en eau de cette plante.

5 L'étude d'une plante d'altitude

Faire preuve d'un sens de l'observation

La gentiane de Koch vit dans les pelouses alpines, à plus de 2000 m d'altitude. Ce milieu est caractérisé par une température moyenne de 2 °C, un enneigement durable, des vents forts et un rayonnement ultraviolet (UV) intense. Cette plante présente un appareil aérien peu développé sans tige et avec des feuilles plaquées au sol, un bourgeon terminal souterrain et une racine contenant des réserves de glucides. La couleur de ses fleurs est due à l'accumulation d'anthocyanes, pigments capables d'absorber les UV.

1. Des gentianes de Koch.



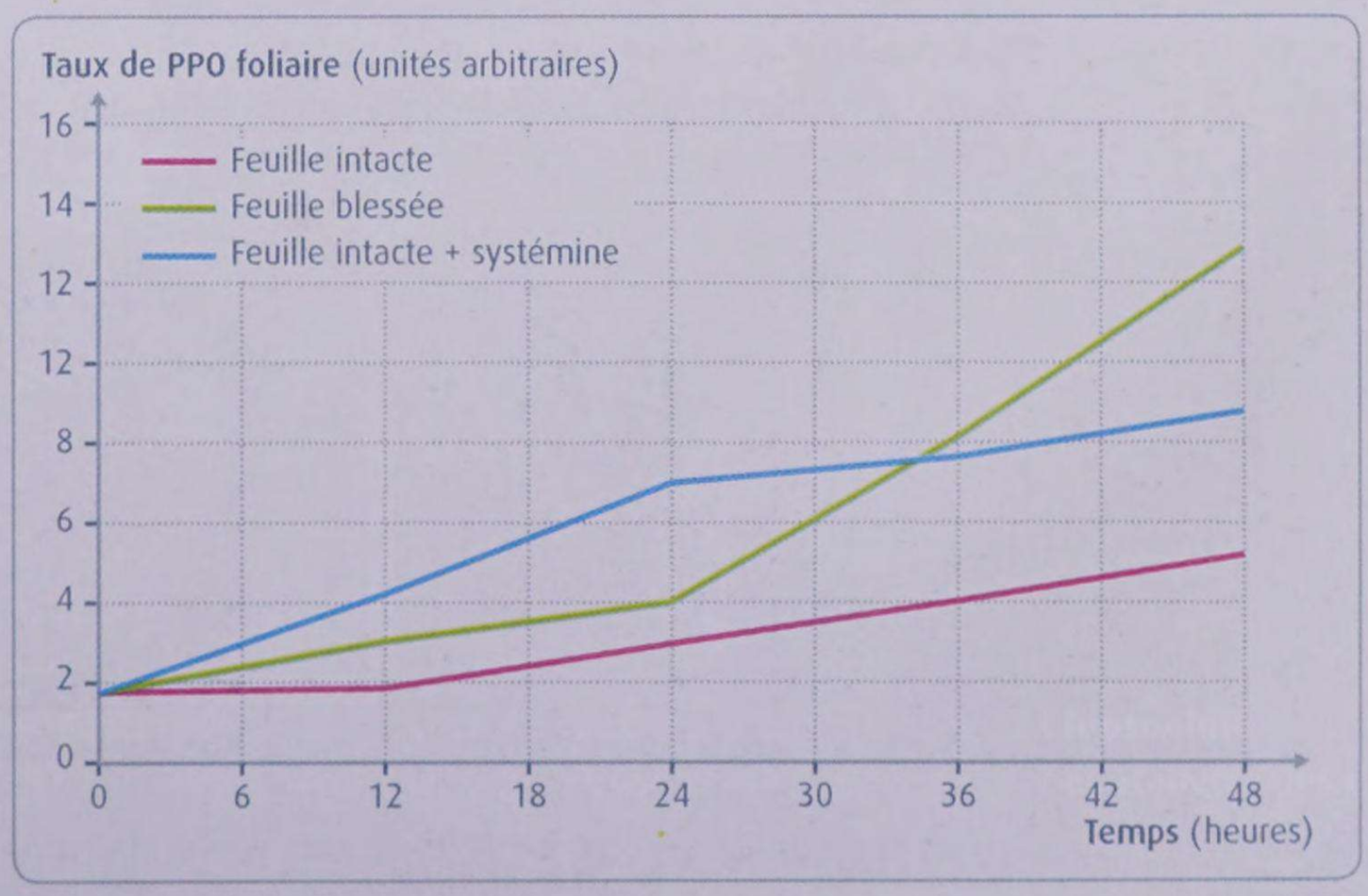
2. Effet de doses variables d'UV sur l'altération de l'ADN dans des tissus végétaux.

● Déterminez les différentes adaptations morphologiques et biochimiques de la gentiane de Koch aux contraintes de la vie en altitude.

6 Les défenses chimiques anti-herbivores de la tomate

Raisonner et construire un schéma

De nombreuses plantes à fleurs contiennent naturellement des molécules toxiques ou répulsives pour les herbivores. Mais lors d'une attaque par ces derniers, les plantes peuvent aussi réagir de façon active. Ainsi, dans la sève élaborée de plantes ayant subi des lésions foliaires, on détecte une protéine – la systémine – qui déclenche la transcription de certains gènes dans le noyau des cellules. Par ailleurs, on sait que des plants de tomate génétiquement modifiés pour ne plus produire cette protéine sont beaucoup plus sensibles aux attaques de chenilles.



1. Évolution au cours du temps de la concentration de la protéine PPO dans une feuille intacte, dans une feuille blessée et dans une feuille intacte après injection de systémine dans la tige du pied de tomate. La PPO est une protéine perturbant le fonctionnement des enzymes digestives des herbivores.

● Reconstituez le mécanisme qui permet à un plant de tomate de réagir à l'attaque de ses feuilles par un herbivore.

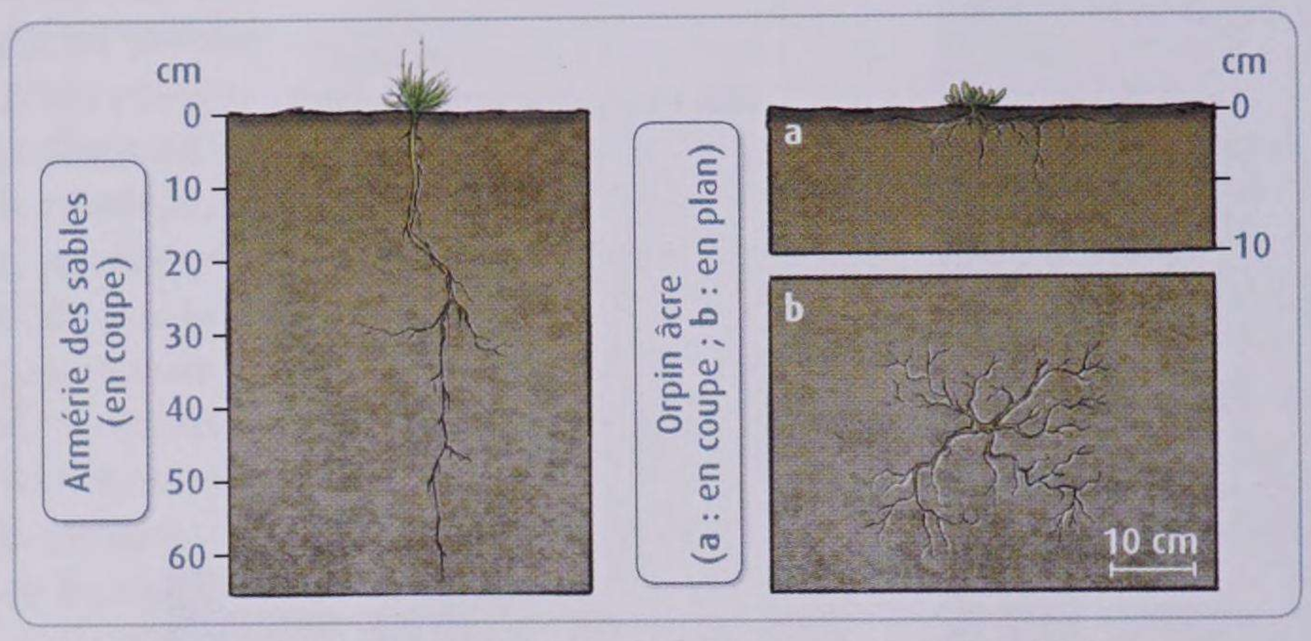
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

7 L'étude du système racinaire de deux plantes

Observer et raisonner

L'armérie des sables et l'orpin âcre sont deux plantes herbacées xérophiles, c'est à dire adaptées à des milieux secs. La première vit dans des sols sablonneux, très poreux, alors que la seconde colonise les pierres et les vieux murs et ne reçoit que l'eau de pluie et de ruissellement.
Le système racinaire de ces deux plantes est schématisé doc. 1.



1. Système racinaire de l'orpin âcre et de l'armérie des sables.

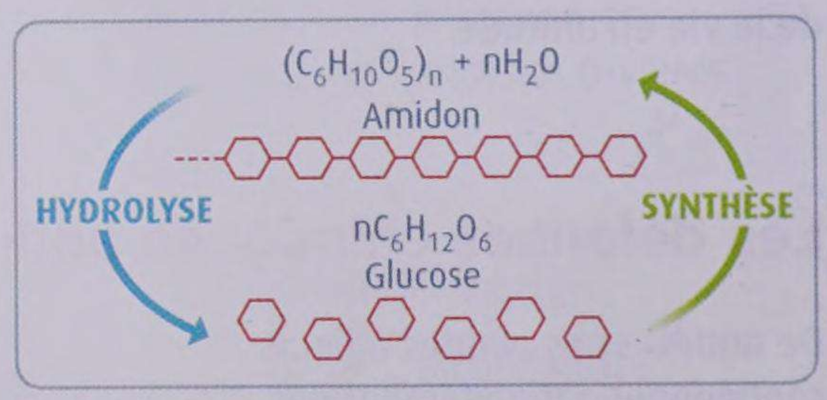
● Déterminez les adaptations du système racinaire de l'orpin âcre et de l'armérie des sables aux contraintes imposées par leur milieu de vie.

8 Le sirop d'érable et l'hiver canadien

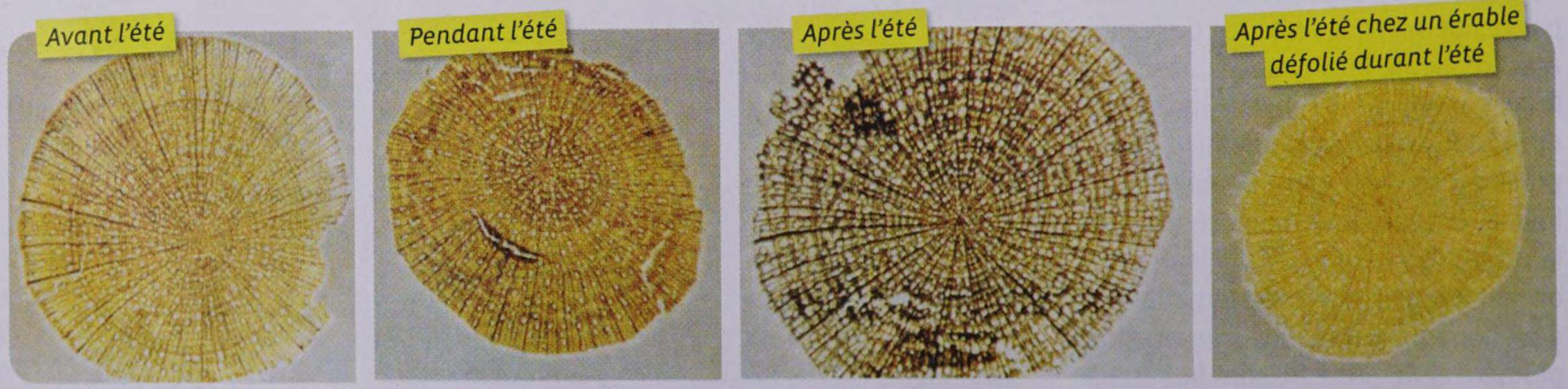
Exploiter des résultats et construire un schéma

Le sirop d'érable canadien, riche en sucres (61,5 % de saccharose*), est issu de la sève de l'érable à sucre (*Acer saccharum*). Malgré les apparences, c'est la sève brute qui est récoltée au printemps, quand les érables sortent de leur « long sommeil hivernal ». Les Amérindiens utilisaient déjà cette montée printanière de sève sucrée, qu'ils recueillaient et concentraient par chauffage. Des coupes de racines d'érables récoltées à différents moments de l'année ont été teintées à l'eau iodée puis observées sous loupe binoculaire.

* Le saccharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) est un glucide formé d'une molécule de glucose ($C_6H_{12}O_6$) et d'une molécule de fructose ($C_6H_{12}O_6$).



2. La réaction de synthèse et d'hydrolyse de l'amidon.



1. Coupes de racines d'érable à sucre à différents moments de l'année après coloration à l'eau iodée.

❶ Décrivez l'évolution de la teneur en amidon dans les racines de l'érable durant l'été et expliquez l'origine de l'amidon accumulé.

❷ Représentez sur un schéma de l'arbre, la circulation des sucres durant l'été et à la fin de l'hiver, en précisant le sens de circulation, la sève et le type de faisceaux conducteurs concernés. Précisez l'origine des sucres du sirop d'érable.

❸ Expliquez en quoi les processus décrits sont une adaptation au passage de la mauvaise saison.

CHAPITRE 2

Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée

La reproduction sexuée implique la rencontre entre des gamètes produits par un individu mâle et ceux produits par un individu femelle. Au cours de l'évolution, des modalités particulières de reproduction se sont mises en place chez les plantes à fleurs. Elles permettent la rencontre des gamètes chez ces êtres vivants qui mènent une vie fixée.

Drosophile et arabette des dames.

En quoi la reproduction des plantes à fleurs est-elle adaptée à leur vie fixée ?

UNITÉ 1

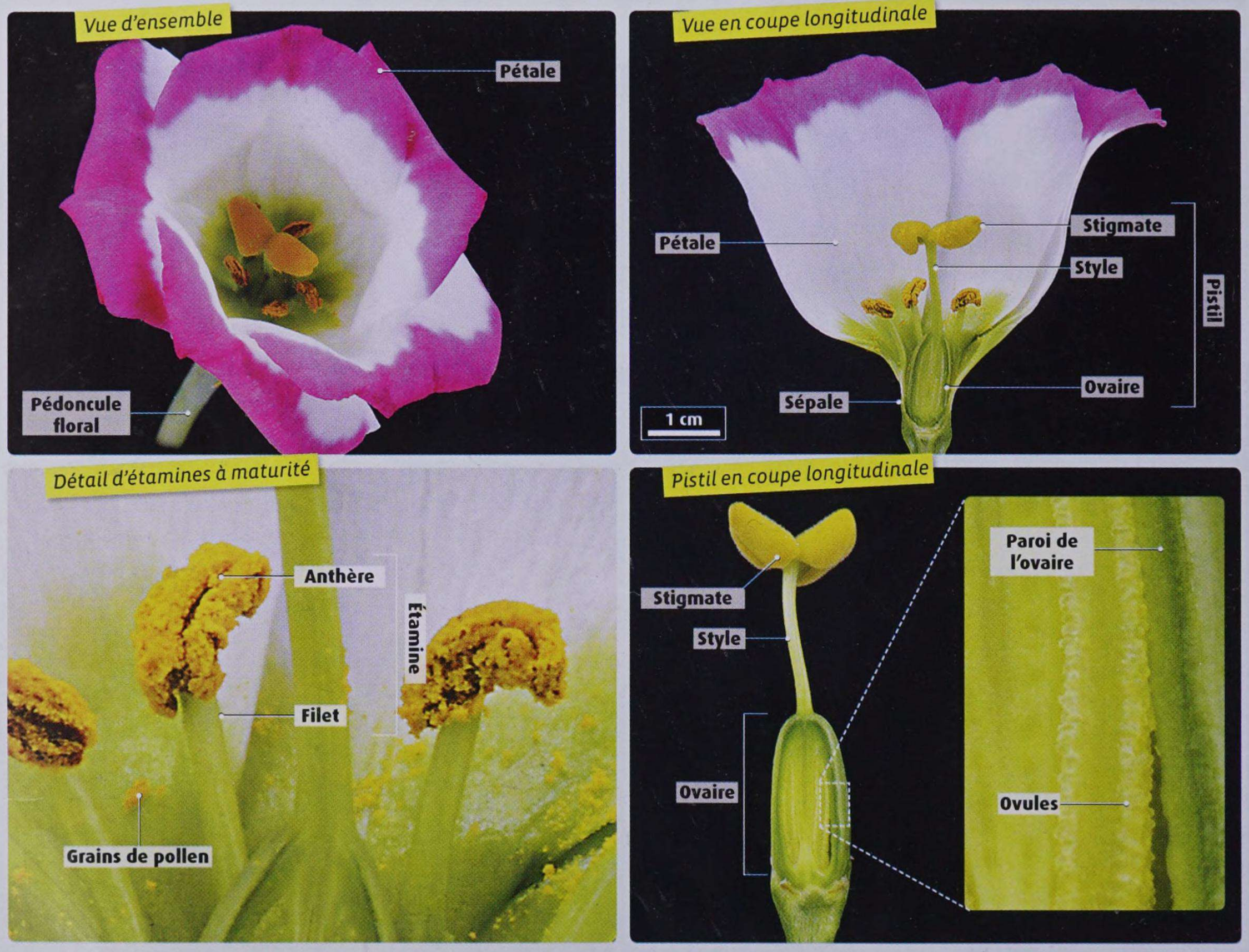
L'organisation des fleurs

Comme leur nom l'indique, les plantes à fleurs présentent, à un moment donné de leur cycle de vie, des fleurs dont l'aspect est très varié. Les fleurs sont les organes reproducteurs de ces végétaux.

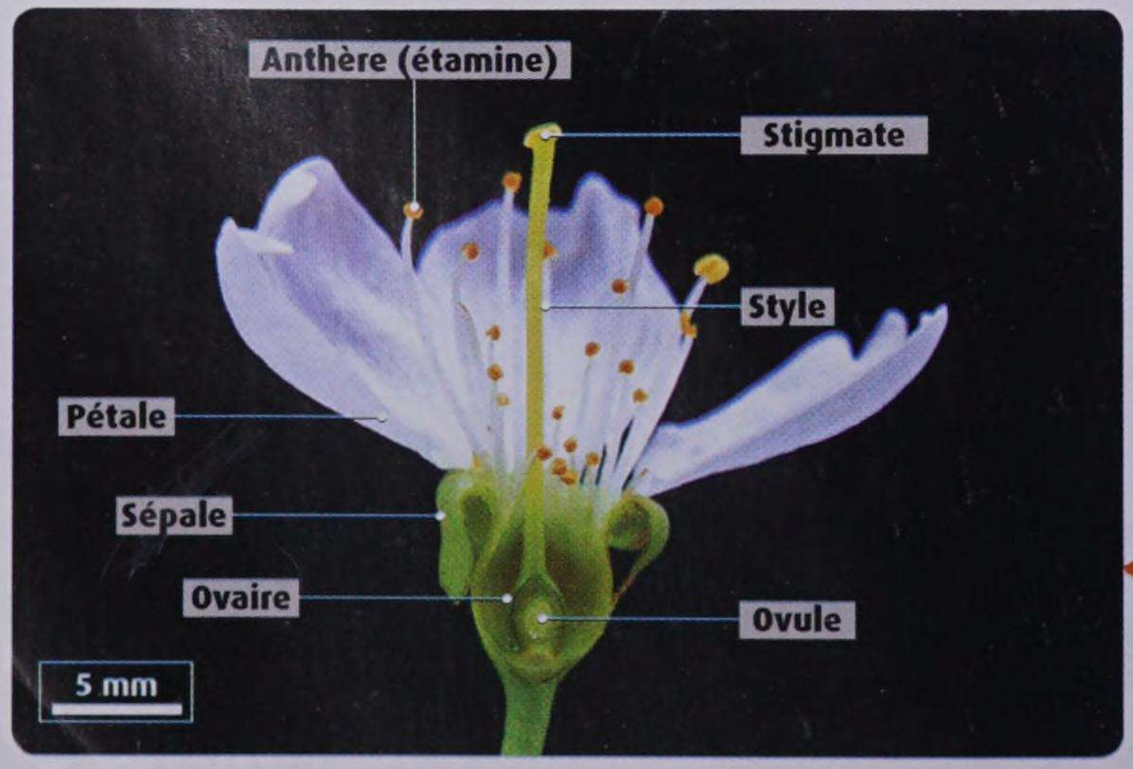
Comment les fleurs sont-elles organisées ?

Observer l'organisation de deux fleurs

TP

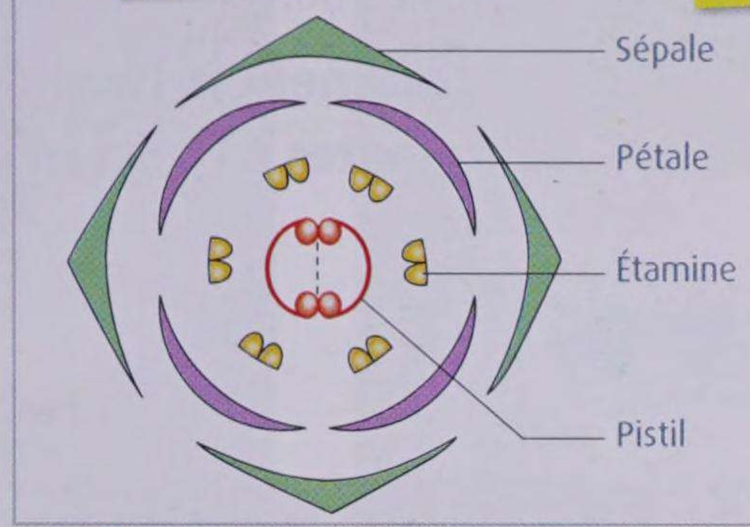


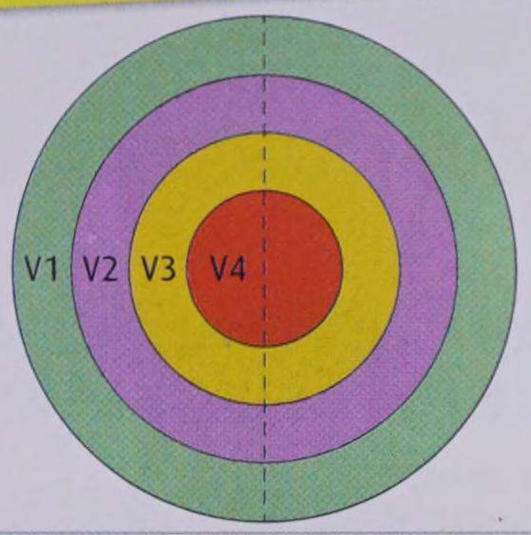
1 La dissection d'une fleur de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*). La fleur est composée de pièces florales : cinq sépales (dont l'ensemble forme le calice), cinq pétales (dont l'ensemble constitue la corolle), cinq étamines (dont les anthères contiennent les grains de pollen) et un pistil (contenant les ovules). Les ovules contiennent les gamètes femelles. Les grains de pollen contiennent les gamètes mâles. Les sépales sont ici de taille très réduite et soudés entre eux.

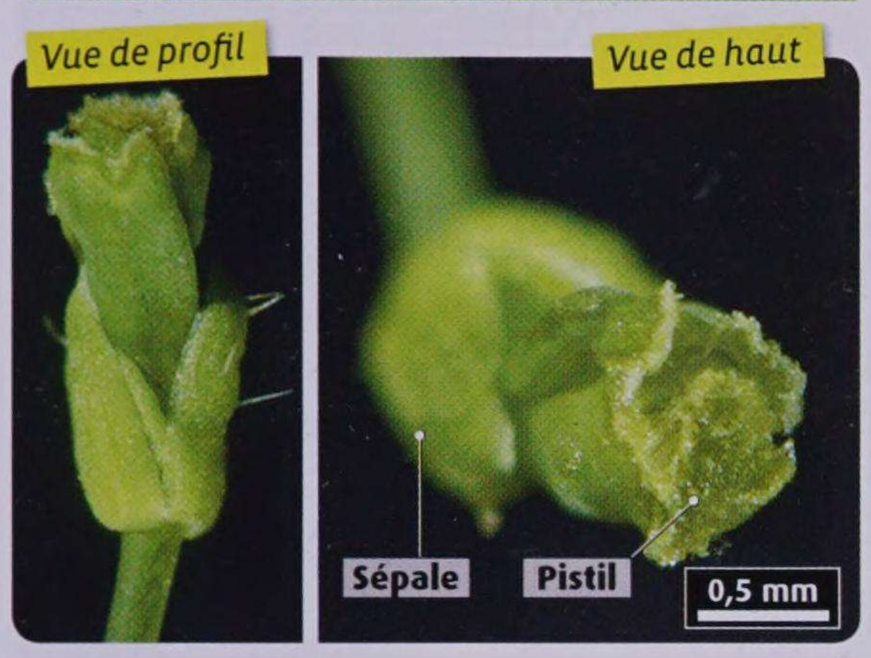


2 Vue en coupe longitudinale d'une fleur de cerisier (*Prunus cerasus*). La fleur comprend 5 sépales, 5 pétales et 4 verticilles de 5 étamines (voir doc. 3). Le pistil contient un unique ovule.

Comprendre le contrôle de l'organisation florale





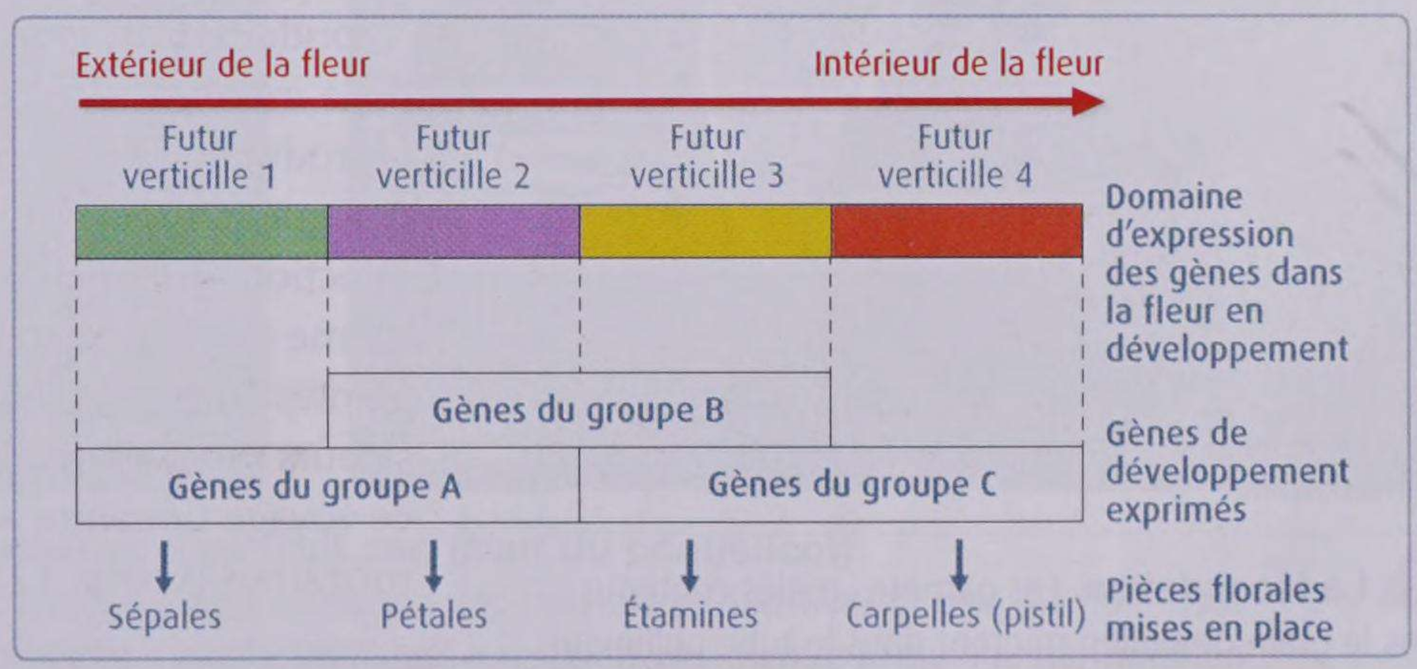


3 Une fleur d'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) et son diagramme floral. Un diagramme floral est une représentation schématique de l'organisation d'une fleur sur laquelle les différentes pièces florales sont disposées en cercles concentriques ou verticilles (V), portant sépales (V1), pétales (V2), étamines (V3) et pistil (V4). Le pistil est constitué d'une ou de plusieurs unités : les carpelles (il y a deux carpelles chez *A. thaliana*).
Il peut y avoir plusieurs verticilles d'étamines.

4 Une fleur du mutant *pistillata* de l'arabette des dames.

Interview de **Catherine Lenne**, enseignant-chercheur en biologie végétale

Les chercheurs ont isolé de nombreuses fleurs mutantes d'*A. thaliana* dont l'organisation est modifiée. Les gènes mutés sont qualifiés de gènes du développement. Ces gènes peuvent être classés en trois groupes, correspondant aux trois phénotypes de fleurs mutantes observés : groupe A (sépales transformés en carpelles et pétales en étamines) ; groupe B (pétales transformés en sépales et étamines en carpelles) ; groupe C (étamines transformées en pétales et carpelles en sépales). L'étude de ces mutants a permis de proposer un modèle de contrôle génétique de l'organisation florale. Ce modèle, dit ABC, propose que l'identité acquise par chaque verticille au sein d'une fleur en développement est contrôlée par l'expression d'une combinaison de gènes de développement des trois groupes A, B ou C.



5 Qu'est-ce que le modèle ABC ?

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Précisez les pièces florales impliquées dans la reproduction.
2 **DOC. 1 À 3.** Réalisez le diagramme floral des fleurs de lisianthus et de cerisier. Comparez l'organisation des fleurs présentées dans chaque document.
3 **DOC. 3 ET 4.** Montrez que la mise en place de la fleur est sous contrôle génétique.
4 **DOC. 4 ET 5.** Précisez à quel groupe appartiennent les gènes mutés du mutant *pistillata* et proposez une explication à son phénotype.
5 **CONCLUSION.** Récapitulez les principales pièces florales en précisant celles qui sont impliquées dans la reproduction. Précisez les modalités de leur mise en place au cours du développement de la fleur.

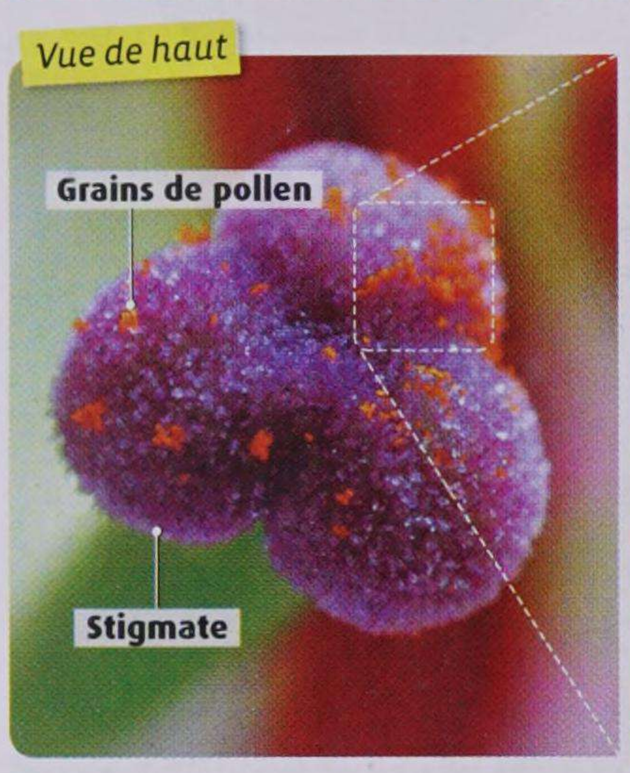
UNITÉ 2

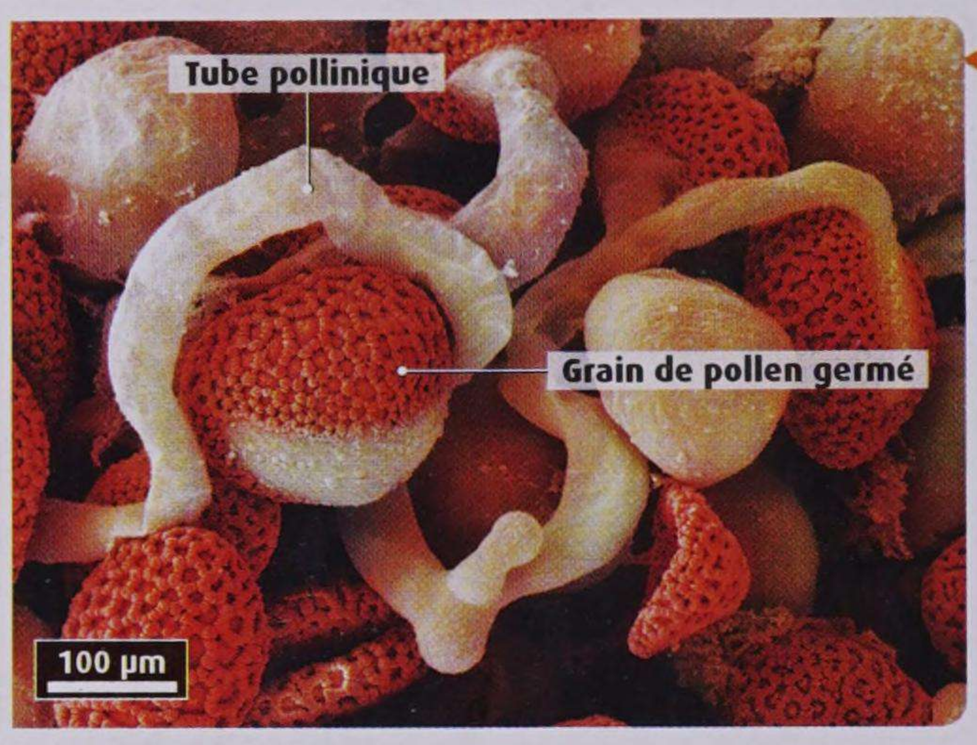
De la fleur au fruit

Dans une fleur, les gamètes mâles sont contenus dans les grains de pollen, tandis que les gamètes femelles sont enfermés dans les ovules. Lors de la fécondation, gamètes mâles et gamètes femelles doivent se rapprocher et fusionner.

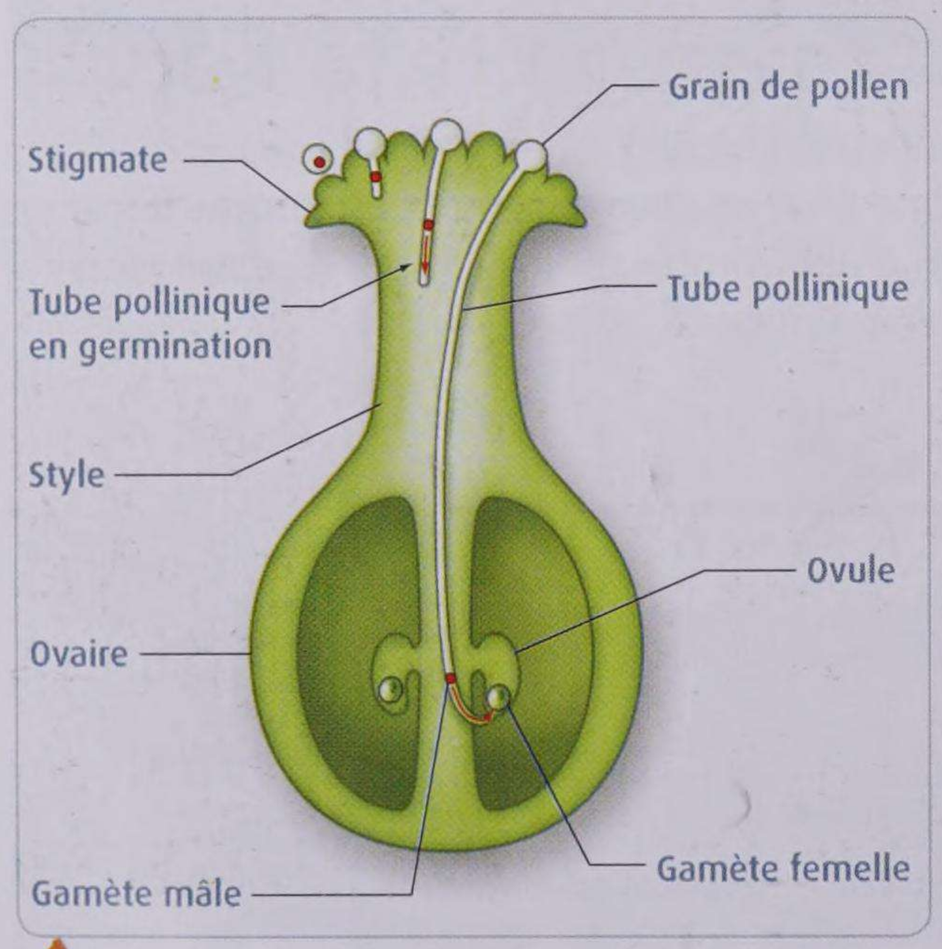
Comment la fécondation est-elle réalisée chez les plantes à fleurs et quelles en sont les conséquences ?

La rencontre des gamètes





1 Pollen en cours de germination sur le stigmate d'une fleur de lis. Après un certain temps de développement de la fleur, le stigmate devient capable de « fixer » les grains de pollen : il est dit réceptif. La fixation du pollen sur le stigmate constitue la pollinisation de la fleur. Elle provoque un afflux d'eau dans le grain de pollen, qui déclenche la croissance d'un tube pollinique : c'est la germination du grain de pollen.



2 La fécondation. Les gamètes mâles contenus dans le grain de pollen migrent dans le tube pollinique et gagnent les ovules, où a lieu la fécondation.

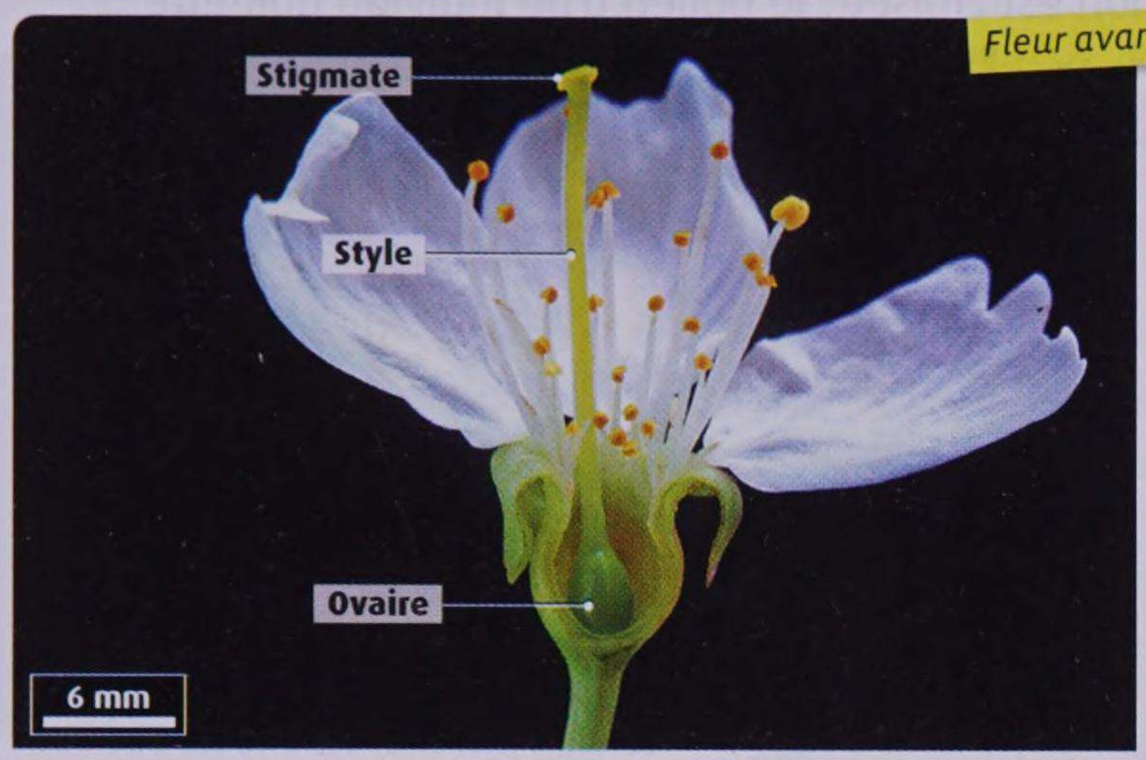
Interview de **Catherine Lenne**, enseignant-chercheur en biologie végétale

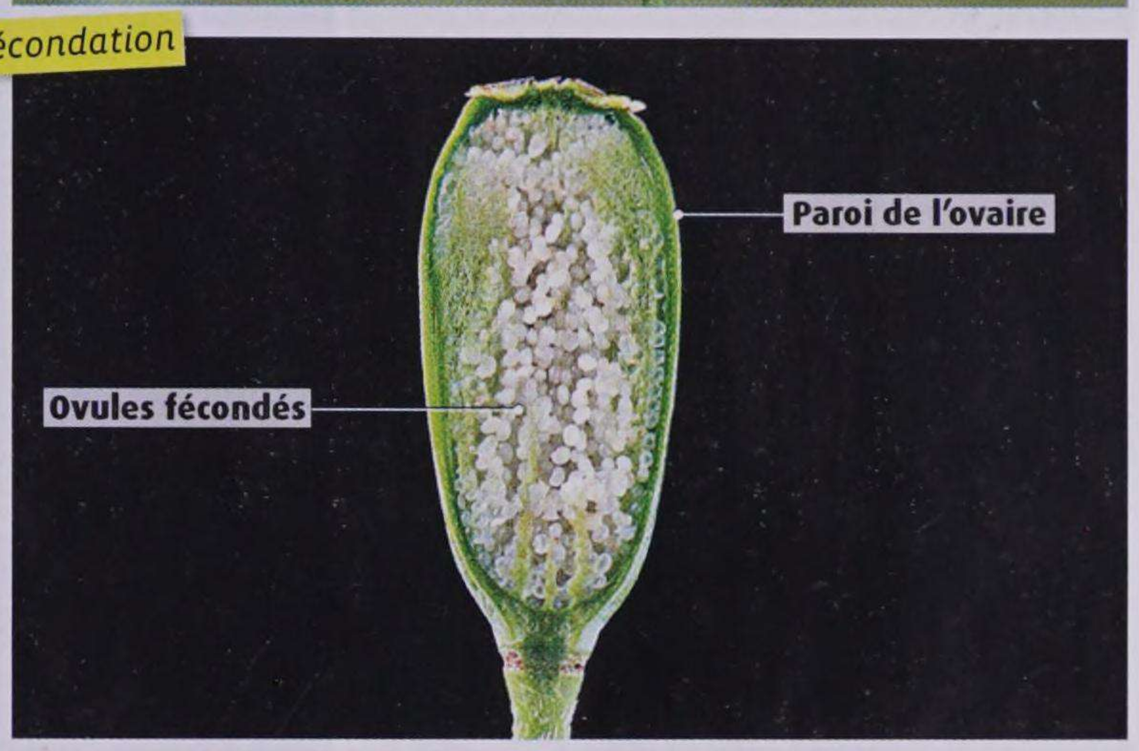
La majorité des fleurs produisent à la fois gamètes mâles et gamètes femelles. Malgré cet hermaphrodisme, des mécanismes variés empêchent souvent qu'un gamète femelle d'une fleur soit fécondé par un gamète mâle provenant de la même fleur ou de la même plante (autopollinisation). La première étape de la reproduction de nombreuses plantes à fleurs est donc le voyage des grains de pollen produits par les anthères d'une fleur en direction du stigmate d'une fleur d'un autre individu de la même espèce : on parle de pollinisation croisée. Dans le cas des plantes entomogames (voir p. 122), ce sont des insectes pollinisateurs (abeilles, mais aussi guêpes, mouches, etc.) qui assurent ce voyage (*entomos* = insecte), tandis que chez les plantes anémogames (voir p. 123), c'est le vent (*anemos* = vent).

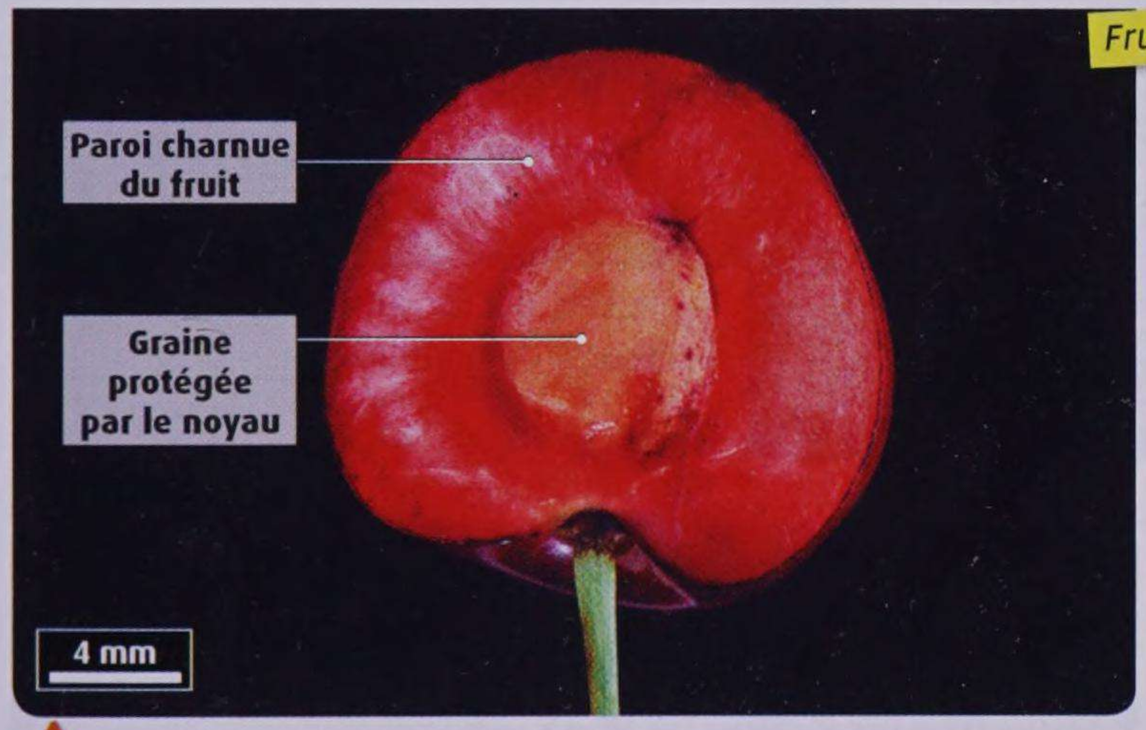
3 Qu'est-ce que la pollinisation croisée ?

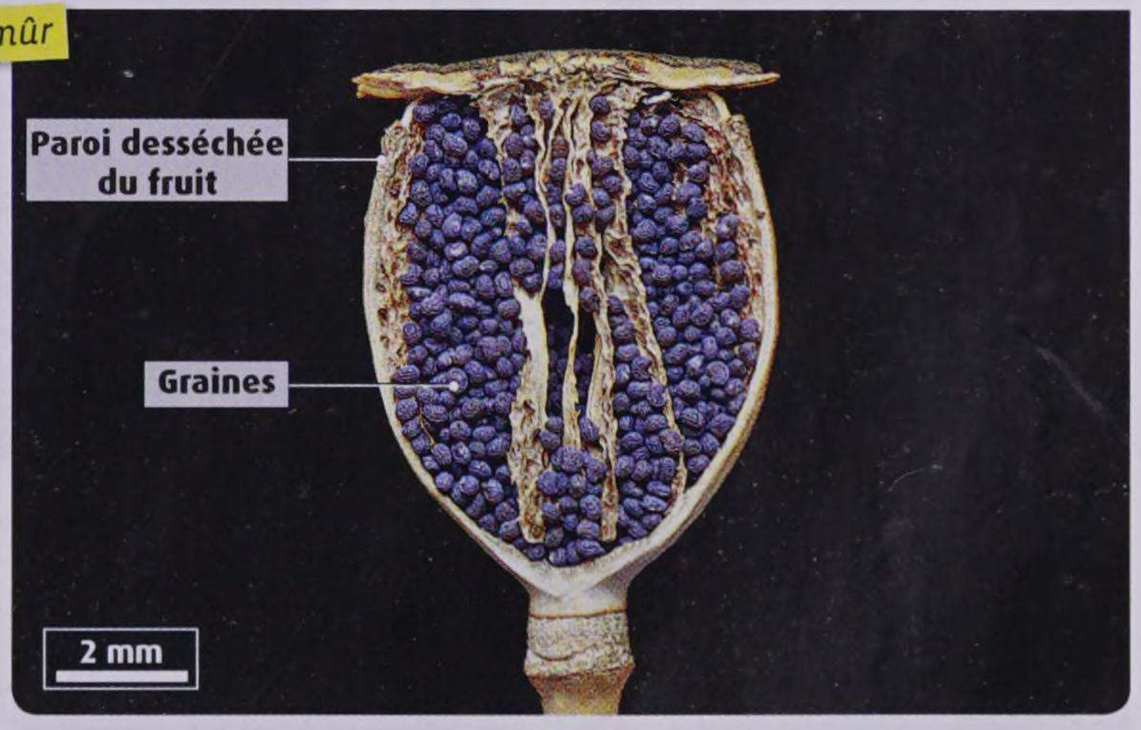
4 Une fleur de *Pelargonium* à deux stades successifs de son développement.

La formation des graines et du fruit









5 La formation d'un fruit charnu (la cerise) et d'un fruit sec (fruit du coquelicot).

Toutes les photos sont des coupes longitudinales. Chaque graine renferme des substances nutritives et une plantule issue du développement du zygote après la fécondation. Cette « plante miniature » reste en vie ralentie jusqu'à la germination de la graine. Elle entame alors son développement et sa croissance, formant un nouvel individu.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À partir des informations présentées dans la double page, résumez les modalités de la fécondation chez les plantes à fleurs et expliquez ses conséquences pour la fleur et pour l'espèce.

Pour cela, vous pouvez :
- établir les étapes menant à la fécondation et expliquer en quoi la pollinisation croisée est avantageuse pour l'espèce **(DOC. 1 À 3)**.
- donner un exemple de mécanisme favorisant la pollinisation croisée **(DOC. 4)**.
- illustrer par un schéma le devenir de chaque type de pièces florales et des ovules après la fécondation **(DOC. 5)**.

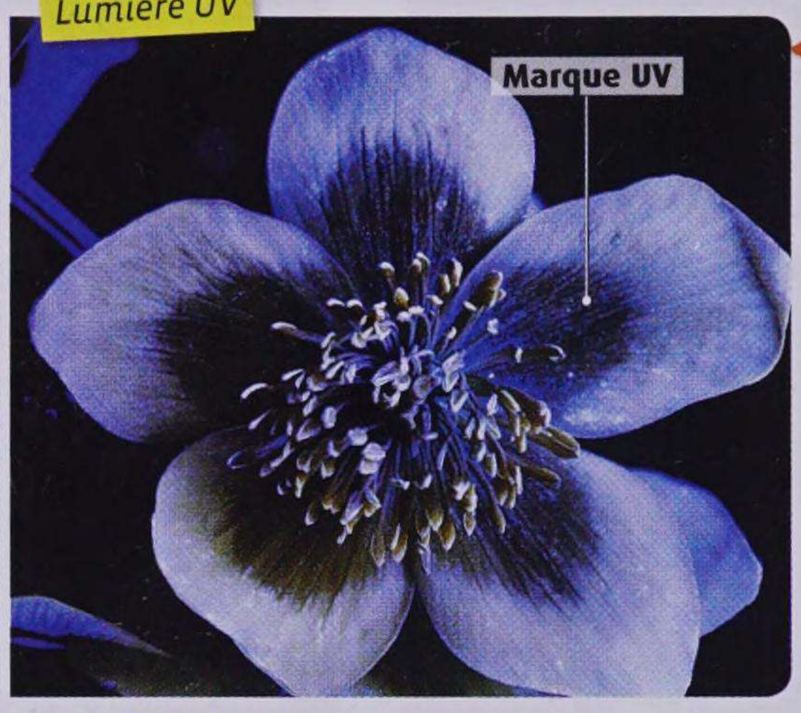
UNITÉ 3

La réalisation de la pollinisation croisée

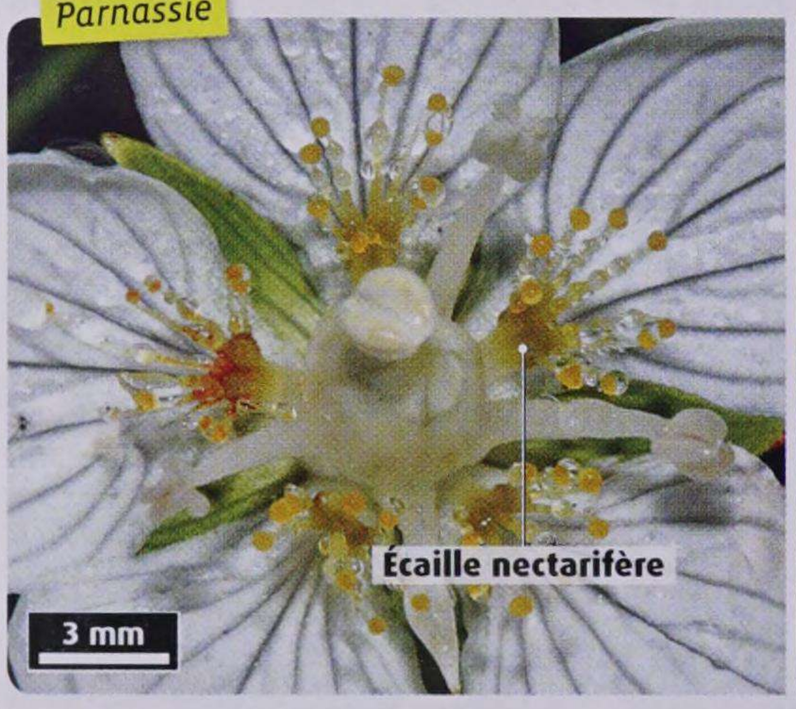
La fécondation implique le dépôt du pollen sur le stigmate du pistil : c'est la pollinisation. Chez la majorité des plantes, la pollinisation est croisée : le pollen d'un individu doit être déposé sur le pistil d'une fleur d'un autre individu. Cela implique un transport du pollen d'une plante à l'autre.

Comment la pollinisation croisée est-elle réalisée ?

Observer des fleurs de plantes pollinisées par les insectes



1 Une fleur de caltha des marais observée en lumière visible et en lumière ultraviolette (UV). Certains insectes, comme les abeilles, perçoivent des radiations de l'ultraviolet proche, invisibles pour l'œil humain. De nombreuses fleurs de plantes entomogames présentent des sortes de « marques » visibles uniquement sous UV.



2 Fleur de parnassie des marais et fleur d'hélébore. De nombreuses plantes entomogames produisent du nectar. Ce dernier est localisé par exemple dans des écailles nectarifères ou dans des pièces florales spécialisées : les nectaires. Lorsqu'ils butinent, abeilles et autres insectes pollinisateurs recherchent le nectar, qui constitue leur principale source de nourriture.

3 Une fleur de *Stapelia variegata*. De nombreuses fleurs de plantes entomogames émettent des odeurs. Ainsi, la fleur de cette *Stapelia variegata*, pollinisée par des insectes se nourrissant de matières fécales, dégage un parfum... nauséabond.

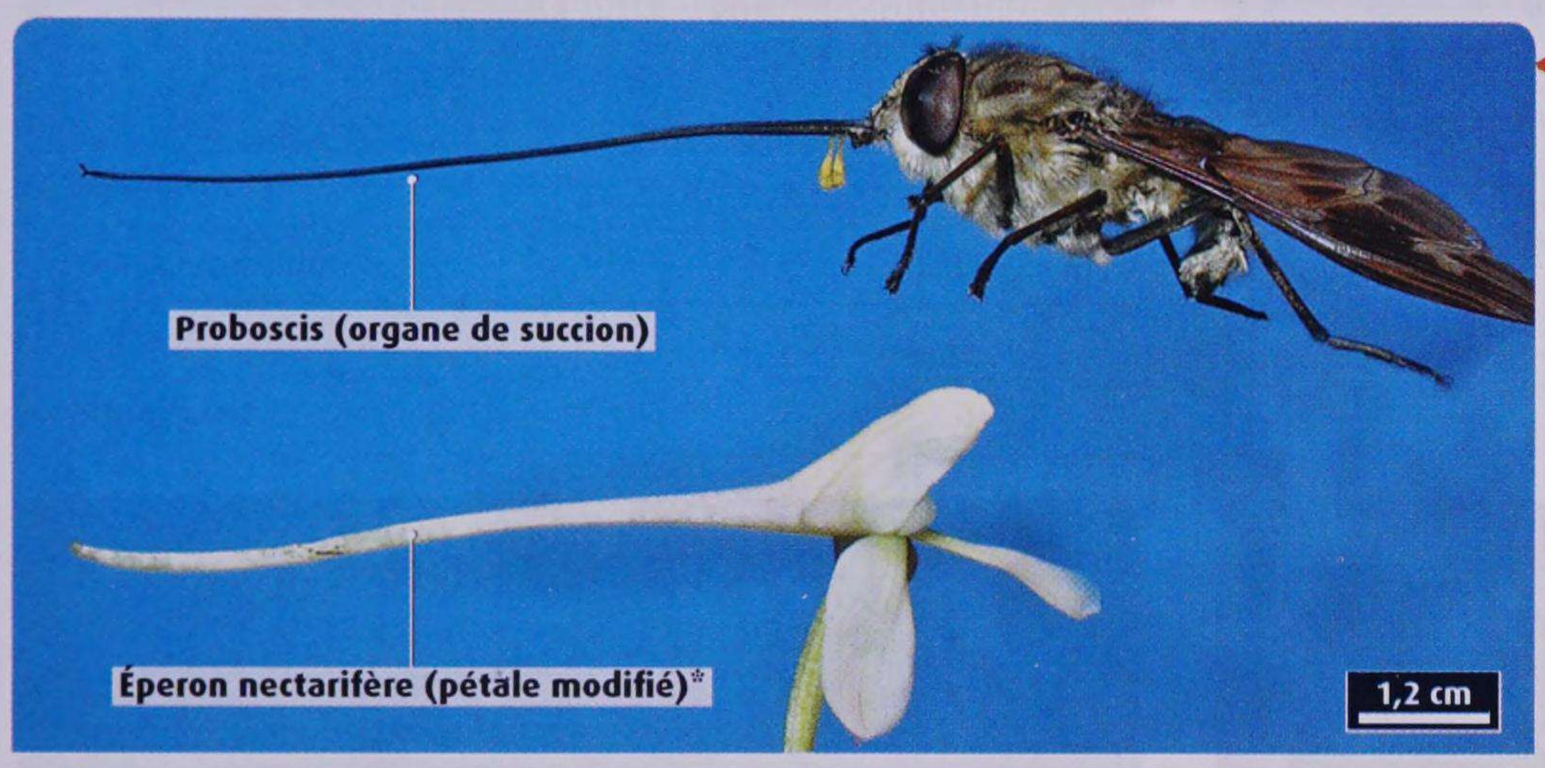
4 Grains de pollen de rose trémière (vus au MEB). L'enveloppe externe des grains de pollen des plantes entomogames est souvent richement ornementée. Le pollen est une source de protéines pour les abeilles. Il entre dans la composition de la nourriture distribuée à la ruche.

Observer une fleur de plante pollinisée par le vent

5 Fleur et pollen de poacée (graminée). Le calice et la corolle sont réduits. À maturité, les anthères des fleurs anémogames peuvent produire des quantités considérables de pollen. Ainsi, un épi de seigle libère jusqu'à un million de grains de pollen par jour. Le pollen des plantes anémogames est souvent lisse et de faible dimension (10 à 25 µm).

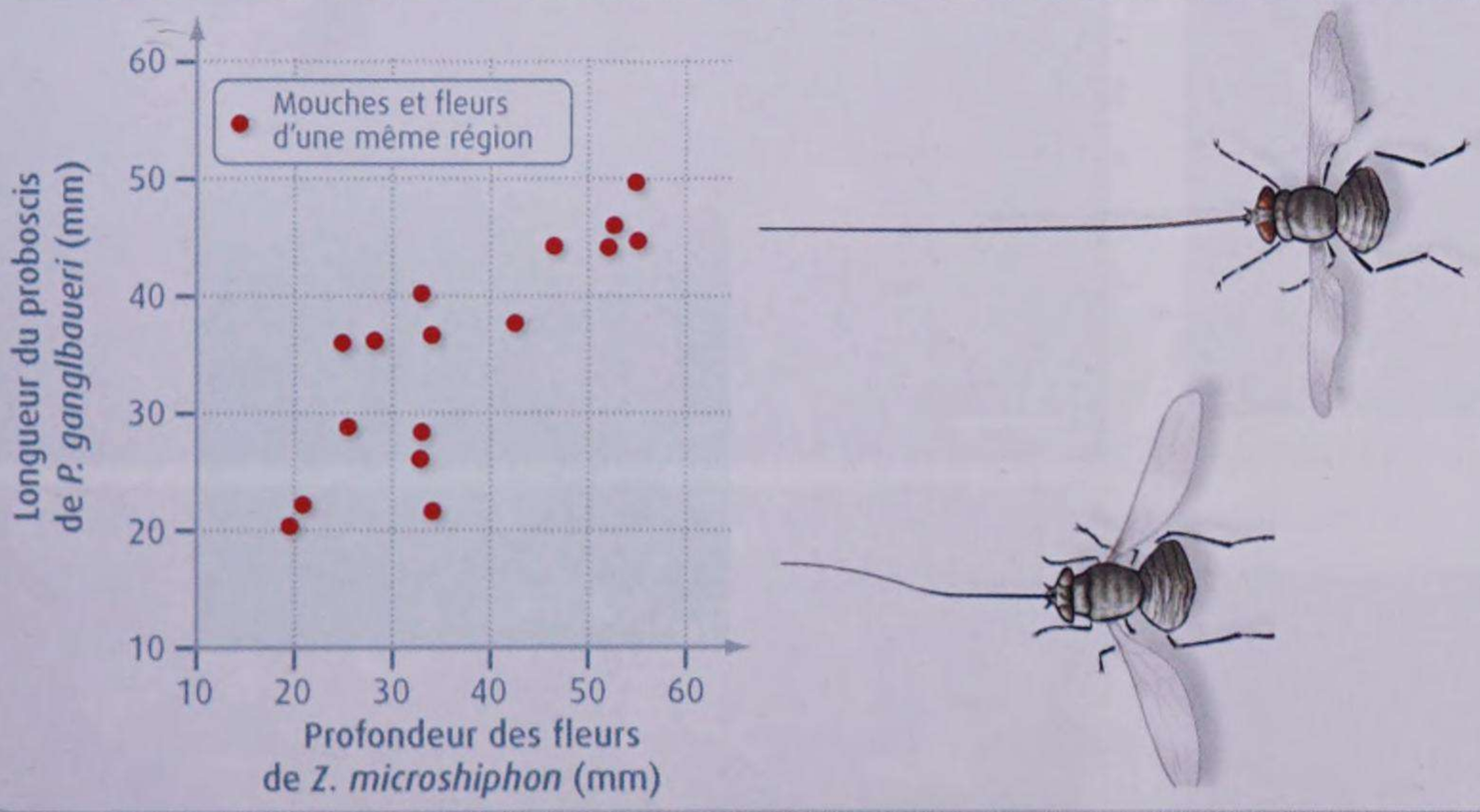
Étudier un cas de coévolution entre plante et insecte pollinisateur

PISTE



6 Une étude de terrain en Afrique du Sud. Dans l'est de l'Afrique du Sud, la fleur de *Z. microshiphon* est majoritairement pollinisée par la mouche *P. ganglbaueri*. Cette dernière, grâce à un proboscis (organe de succion), accède au nectar situé au fond d'une profonde corolle, dans un éperon nectarifère. Des chercheurs ont étudié la correspondance entre la longueur du proboscis des mouches et la profondeur des fleurs dans 16 régions isolées les unes des autres (graphique ci-dessous).

*L'éperon nectarifère présenté est celui d'une autre fleur (orchidée), également polinisée par *P. ganglbaueri*.



Vocabulaire

Coévolution : Ensemble de transformations coordonnées de deux espèces en interaction l'une avec l'autre au cours de l'évolution. Chaque innovation chez une espèce ayant un effet sur l'interaction, elle contribue à la sélection d'un nouveau caractère symétrique chez l'autre espèce.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 4.** Décrivez la variété des dispositifs par lesquels les plantes à fleurs peuvent attirer les insectes pollinisateurs et faciliter la pollinisation.
2. **DOC. 5.** Décrivez les dispositifs qui favorisent la rencontre entre les grains de pollen et le stigmate dans le cas des fleurs pollinisées par le vent.
3. **DOC. 6.** Expliquez en quoi les résultats de l'étude de terrain suggèrent qu'il y a eu coévolution entre la plante pollinisée et l'insecte pollinisateur.
4. **CONCLUSION.** Récapitulez les adaptations des fleurs qui facilitent la réalisation de la pollinisation croisée.

UNITÉ 4

La dispersion des graines

Après la fécondation, l'ovaire se transforme en fruit et les ovules fécondés en graines. Les graines doivent être dispersées dans le milieu de vie de la plante. Or celle-ci est un organisme fixé.

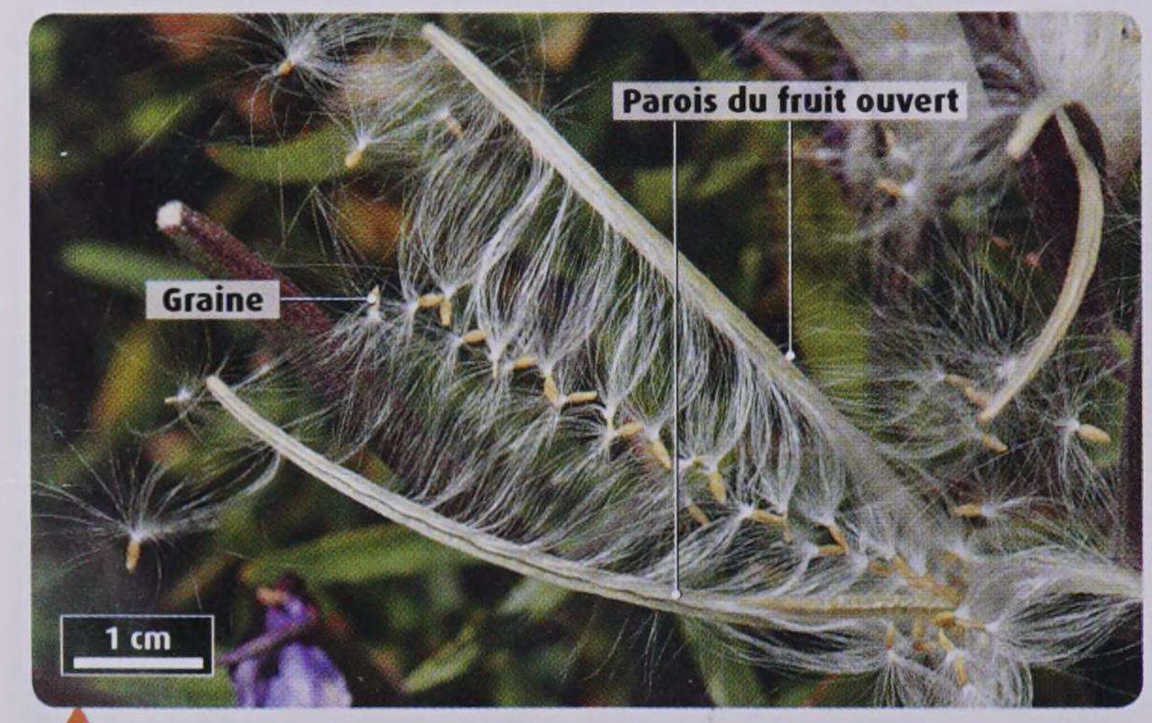
Comment les graines sont-elles dispersées ?

La diversité des modes de dispersion des graines

Dans une forêt de 50 ha, des chercheurs ont étudié la relation entre la distribution spatiale de plusieurs centaines d'espèces et le mode de dispersion de leurs graines. Des agents abiotiques comme le vent ou l'eau peuvent transporter les semences, mais les animaux en sont les principaux agents disséminateurs. En outre, la dissémination peut être passive (certaines structures des graines ou des fruits favorisent leur transport) ou active (les fruits émettent des signaux attractifs pour un animal qui va les consommer).

Mode de dispersion	Nombre d'espèces étudiées	Distance moyenne entre les nouvelles plantes et les plantes mères
Balistique (à maturité, les fruits secs éjectent les graines)	16	31,1 m
Vent	19	64,5 m
Animal de taille inférieure à 2 cm	209	99,3 m
Animal de taille comprise entre 2 et 5 cm	177	120,6 m
Animal de taille supérieure à 5 cm	87	157,8 m

1 **Une étude de terrain en Malaisie.**



2 **Fruit et graines de l'épilobe.**

3 **Fruits du cornouiller et crotte de renard.**

4 **Fruits de l'aigremoine.**

Un exemple : la dispersion des graines par les primates

PISTE

La réserve forestière de Kibale

Un chimpanzé dans la réserve forestière de Kibale

5 Une étude de la dispersion des graines par les primates de la réserve forestière de Kibale (Ouganda). Dans les forêts tropicales, les primates représentent 25 à 40 % des mangeurs de fruits. Une étude menée dans la réserve forestière de Kibale a montré que les fruits comptent pour 82 % de la ration alimentaire des chimpanzés. On a également estimé que les singes à queue rouge, les singes bleus, les mangabeys et les chimpanzés rejettent sur 1 km² les graines de 35 000 fruits par jour (dans leurs crottes ou en crachant).

Espèce étudiée	Pourcentage de germination	
	Graines issues d'excréments	Graines non issues d'excréments
Chrysophyllum	33,2	0
Tabernaemontana	19,5	11
Mymusops bagshawei	87,5	0
Aframomum	42,9	0

6 Une étude de la germination des graines dans la réserve forestière de Kibale. Cette étude suggère en outre que, pour 60 % des espèces analysées, les graines germent avec une fréquence moindre lorsqu'elles restent au pied de la plante qui les a engendrées.

Type de fruit	Proportion dans la ration alimentaire	Proportion parmi les fruits de la forêt
À pulpe douce et juteuse	85 %	45 %
À pulpe fibreuse et juteuse	3 %	2 %
À pulpe très réduite	11,7 %	23 %
Fruit sec	0,3 %	30 %

7 Les fruits mangés par les gibbons dans une forêt de Bornéo. La plupart des primates choisissent de préférence les fruits les plus sucrés, plus riches en énergie. Au cours de l'évolution, ils ont donc acquis une capacité de plus en plus fine à détecter par le goût les fruits sucrés.

« Sur ces différents continents [Afrique, Eurasie et « Nouveau monde »], les plantes à fleurs et à fruits charnus se sont diversifiées en même temps que les primates, ceux-ci contribuant à la dissémination dans leurs fèces des graines des fruits les plus sucrés. Les gènes des plantes dont les fruits sont les plus riches en sucres ont été (et sont encore) favorisés par les choix préférentiels qu'en font les animaux disséminateurs des graines, d'une façon aussi efficace que par la sélection empirique qui a été, pendant des siècles, appliquée par l'Homme aux espèces cultivées. Il en résulte que les pulpes des fruits des forêts tropicales ont des teneurs en sucres qui, très souvent, avoisinent celles des variétés les plus succulentes sélectionnées par les horticulteurs. Par exemple, [...] le genre *Santiria* présente des formes avec une quantité de sucre exceptionnelle : les trois quart de la matière sèche, ce qui constitue une véritable confiture ! »

C. M. Hladik, « Le comportement alimentaire des primates », *Primatologie*, n° 5 (2002).

8 La teneur en sucre des pulpes des fruits tropicaux.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Comparez les différents modes de dispersion et leurs conséquences écologiques sur le peuplement d'un nouveau milieu.
2. **DOC. 2 À 4.** Décrivez, pour les différentes espèces présentées, le mode de dispersion des graines et l'adaptation de chaque graine ou fruit.
3. **DOC. 5 ET 6.** Expliquez comment se manifeste la collaboration entre les primates et les plantes à fleurs dans les forêts tropicales.
4. **DOC. 7 ET 8.** Expliquez en quoi on peut dire que cette collaboration est le résultat d'un processus de coévolution.
5. **CONCLUSION.** Récapitulez les différentes stratégies de dispersion des graines.

UNITÉS

BILAN DES

CHAPITRE 2

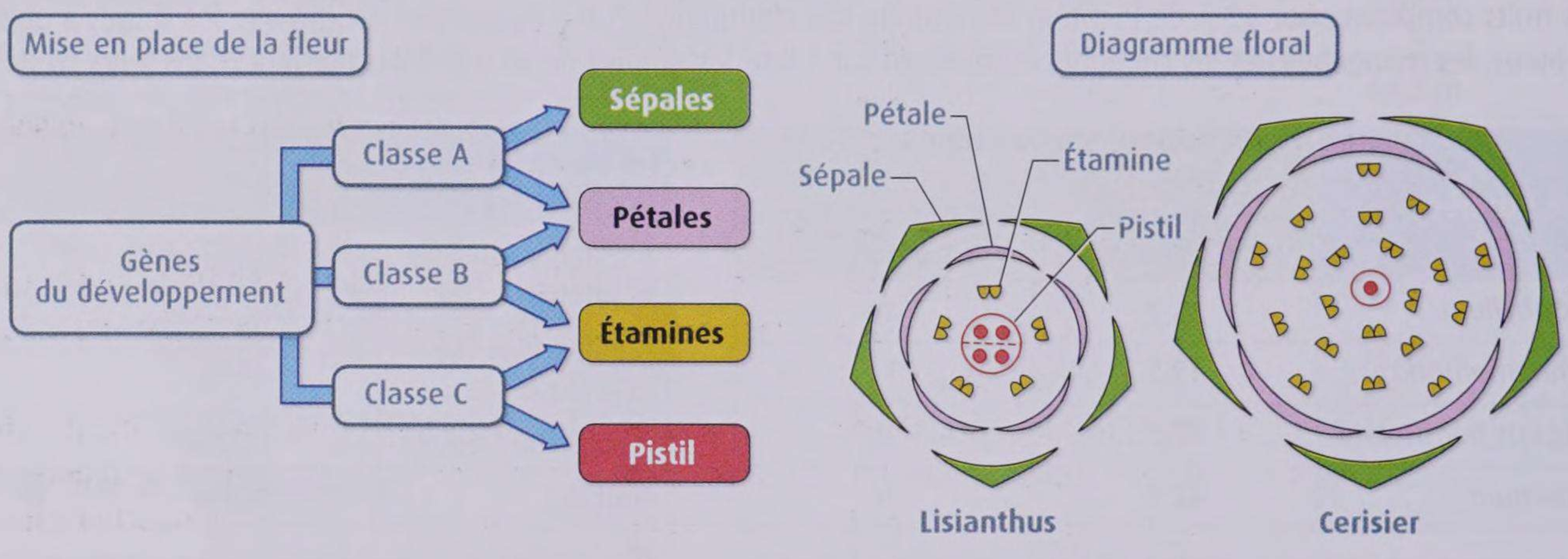
Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée

UNITÉ 1 L'organisation des plantes à fleurs

• Les fleurs ont une organisation commune en verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur, on trouve : le verticille V1, ou calice, constitué par les sépales ; le verticille V2, ou corolle, constitué par les pétales ; le (ou les) verticille(s) V3 constitué(s) par les étamines ; le verticille V4 constitué par le pistil.

• Certaines pièces florales sont impliquées directement dans la reproduction : le pistil, organe femelle contenant les ovules, et les étamines, organes mâles, dont les anthères contiennent les grains de pollen.

• La mise en place des pièces florales s'effectue sous l'action de gènes du développement classés en 3 groupes (A, B et C). La mutation de l'un de ces gènes entraîne la formation d'une fleur anormale. Par exemple, les fleurs du mutant *pistillata* de l'arabette des dames contiennent uniquement des sépales et un très gros pistil.



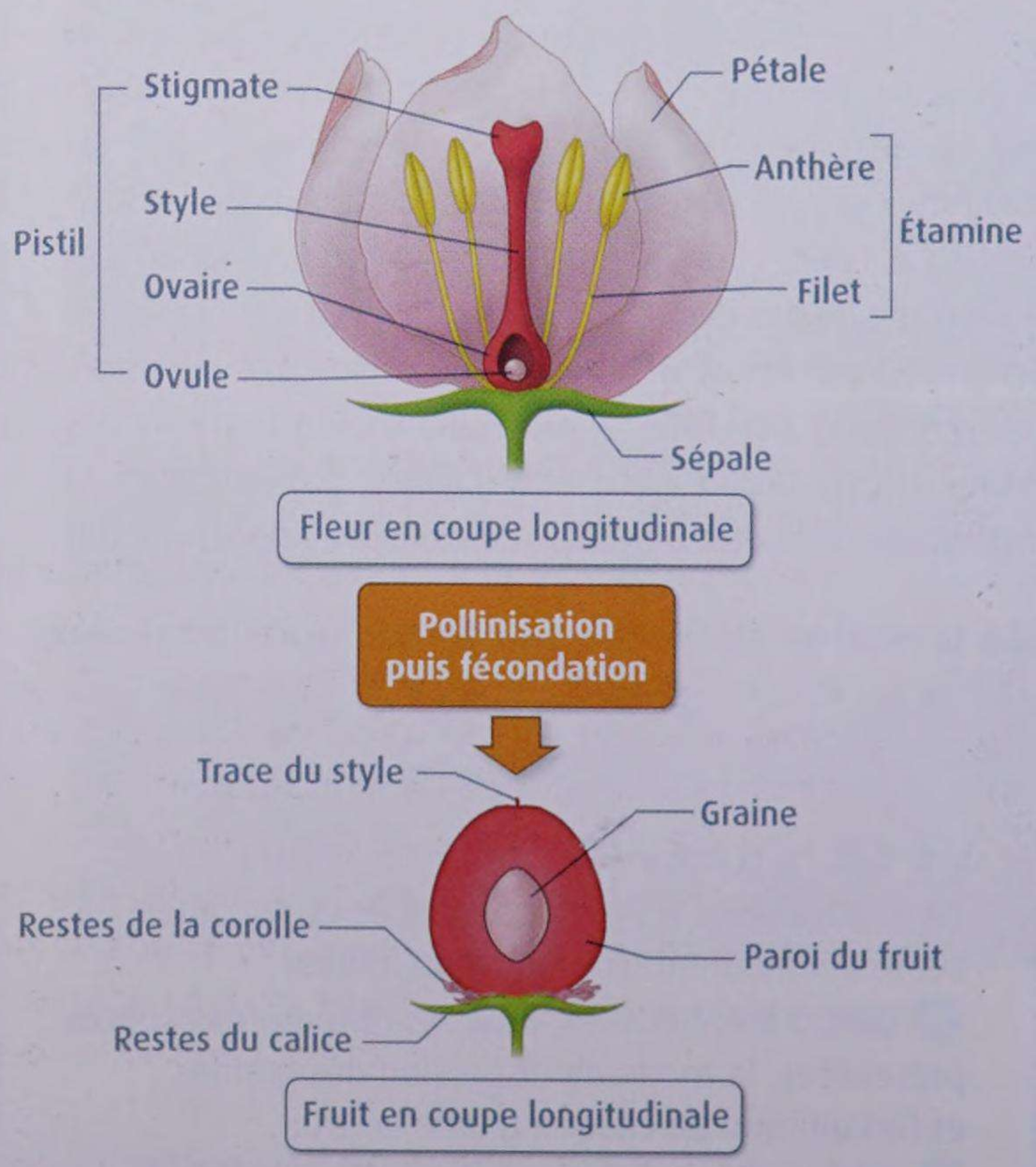
Mise en place et organisation de la plante à fleur.

UNITÉ 2 De la fleur au fruit

• Chez la plupart des fleurs, la pollinisation est croisée : les grains de pollen produits par une fleur sont déposés sur le stigmate du pistil de fleurs d'autres individus de la même espèce. Le transport du pollen est réalisé par les insectes (plantes entomogames) ou par le vent (plantes anémogames). La pollinisation croisée favorise le brassage génétique au sein de l'espèce.

• Une fois les grains de pollen sur le stigmate, un afflux d'eau leur permet de germer : chaque grain développe un tube pollinique qui croît dans le style jusqu'aux ovules. Le gamète mâle contenu dans le grain de pollen féconde alors le gamète femelle contenu dans chaque ovule.

• Après la fécondation, la fleur se transforme en fruit : la paroi de l'ovaire forme généralement la paroi du fruit et chaque ovule fécondé forme une graine.



De la fleur au fruit.

UNITÉ 3 La réalisation de la pollinisation croisée

- Les plantes à fleurs, ayant une vie fixée, ont développé certaines adaptations favorisant la pollinisation croisée, que ce soit grâce aux insectes ou au vent.
- Les fleurs pollinisées par les insectes (plantes entomogames) émettent différents signaux qui attirent les insectes pollinisateurs. Leurs grains de pollen sont assez gros et sont richement ornementés, ce qui facilite leur adhésion au corps des insectes qui visitent les fleurs. Ces derniers y trouvent des ressources nutritives : pollen et nectar. Le pollen s'accroche aux insectes lorsqu'ils visitent une fleur et prélèvent ces ressources. Il est ensuite déposé sur le stigmate d'une autre fleur qu'ils visitent.

Type de signal attractif	Exemple
Signaux visuels	• Corolle de grande taille et colorée • Présence de marques attirant les insectes vers le cœur de la fleur
Signaux chimiques	Émission de substances volatiles odorantes
Signaux trophiques	• Pollen • Nectar

Quelques signaux attractifs chez les fleurs pollinisées par les insectes.

- À l'inverse, les fleurs pollinisées par le vent (plantes anémogames) sont, le plus souvent, de petite taille et elles émettent en grande quantité un pollen dont les grains sont très petits et lisses. Leurs étamines et leur pistil sont souvent bien exposés au vent, à l'extérieur des autres pièces florales.
- Il y a eu une coévolution entre plantes pollinisées et insectes pollinisateurs. Cela signifie que l'organisation des plantes à fleurs a évolué conjointement avec les organes des insectes permettant de repérer les fleurs et d'y récupérer des ressources nutritives. L'avantage sélectif est, pour la plante, une reproduction plus efficace et, pour l'insecte, l'accès à des ressources supplémentaires.
- Cette coévolution est particulièrement flagrante dans le cas des fleurs pollinisées par un insecte d'une espèce bien précise. On observe par exemple une corrélation entre la longueur de la trompe de certaines mouches (qui leur permet de prélever le nectar) et la longueur de l'éperon au fond duquel se trouve le nectar dans l'orchidée qu'elles pollinisent.

UNITÉ 4 La dispersion des graines

- La dispersion des graines est indispensable à la pérennité de l'espèce et permet la colonisation de nouveaux territoires.
- La dispersion des graines fait intervenir principalement le vent et les animaux. Les graines dispersées par le vent sont petites, légères et peuvent posséder des dispositifs qui favorisent leur portance (dispersion passive). Les graines dispersées par les animaux sont généralement dans des fruits charnus, colorés et riches en sucres, attractifs pour les animaux. Ces derniers les consomment et rejettent les graines dans leurs excréments ou leurs crachats (dispersion active). D'autres graines dispersées par les animaux sont au sein de fruits qui adhèrent au pelage (dispersion passive).
- On note souvent une collaboration entre les animaux disséminateurs des graines et la plante qui les produits. Avec les fruits, l'animal accède à une ressource nutritive. Quant à la plante, elle est mieux disséminée dans son milieu. En effet, d'une part le transport par les animaux permet la colonisation de nouveaux territoires et, d'autre part, le taux de germination des graines est souvent meilleur lorsque ces dernières sont passées par l'appareil digestif d'un animal et/ou lorsqu'elles germent loin de la plante mère.
- La collaboration entre un animal disséminateur et une plante est le produit d'une coévolution.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2

Reproduction des plantes à fleurs et vie fixée

L'essentiel par le texte

Du développement de la fleur à la pollinisation

• Les **fleurs** sont composées de pièces florales disposées en cercles concentriques, ou verticilles : sépales, pétales, étamines et pistil. Les **gènes du développement** contrôlent la mise en place des différents verticilles.

• Les étamines et le pistil sont les organes reproducteurs de la plante. Les ovules que renferme le pistil contiennent les gamètes femelles et les grains de pollen que renferment les étamines contiennent les gamètes mâles.

• La première étape de la reproduction d'une plante à fleur est la **pollinisation**. Chez la plupart des espèces, les grains de pollen produits par une fleur doivent être déposés sur le pistil de fleurs d'autres individus de la même espèce : la pollinisation est dite croisée et le transport du pollen est réalisé généralement soit par les insectes, soit par le vent.

• Les fleurs pollinisées par les insectes attirent ces derniers grâce à des signaux variés. La pollinisation implique alors une collaboration entre l'insecte et la plante qui est le produit d'un processus de **coévolution**.

De la pollinisation à la dissémination des graines

• Suite à la pollinisation, le grain de pollen germe dans le pistil puis les gamètes mâle et femelle peuvent se rencontrer. Si une fécondation a lieu, la fleur se transforme en **fruit** contenant des **graines**. Chaque ovule fécondé forme une graine et c'est généralement la paroi de l'ovaire qui forme la paroi du fruit, tandis que les autres pièces florales disparaissent.

• La dispersion des graines est indispensable à la pérennité de l'espèce et elle permet la colonisation de nouveaux territoires. Les graines ou les fruits qui les contiennent peuvent être dispersés par le vent ou par des animaux qui les consomment ou les transportent.

• Les fruits ou graines sont adaptés à leur mode de dissémination. Dans le cas d'une dissémination par les animaux, les fruits sont souvent charnus, odorants et riches en réserves, et la dissémination implique une collaboration entre l'animal et la plante. Cette dernière est le produit d'un processus de coévolution.

Les capacités et attitudes

- Réaliser la dissection d'une fleur simple et traduire les observations sous une forme schématique simple (diagramme floral) **(unité 1)**
- Traduire les mécanismes de transformation de la fleur en fruit par un schéma **(unité 2)**
- Recenser, extraire et organiser des informations afin de mettre en évidence les stratégies de pollinisation **(unité 3)**
- Analyser des observations et des résultats expérimentaux afin de mettre en évidence les relations entre une plante et un animal disséminateur **(unité 4)**

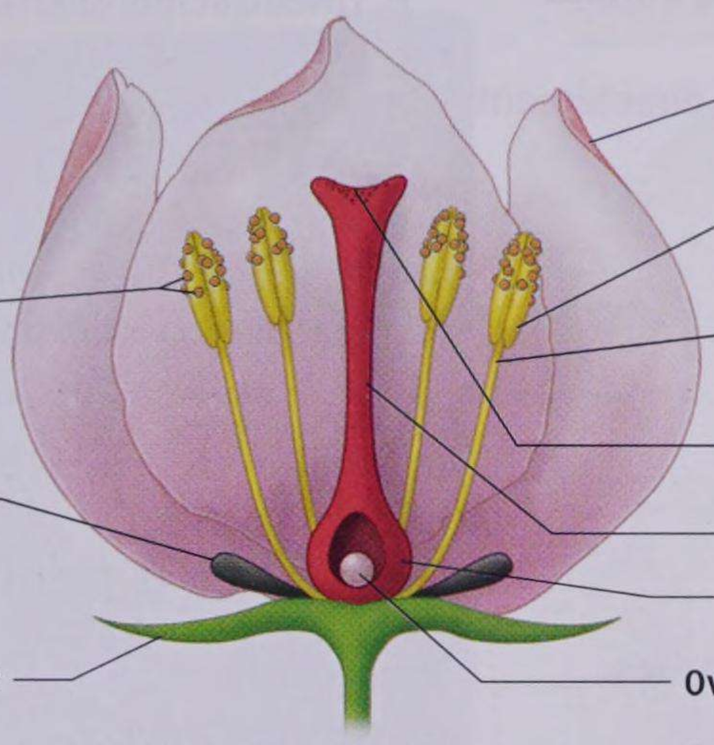
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Coévolution : ensemble de transformations coordonnées de deux espèces en interaction l'une avec l'autre au cours de l'évolution.
Fleur : partie d'un végétal comprenant les organes reproducteurs.
Fruit : organe contenant des graines, issu de la transformation d'une fleur suite à la pollinisation et à la fécondation.
Gène du développement : gène responsable de la mise en place des organes.
Graine : organe des plantes à fleurs qui renferme des réserves et une plantule en vie ralentie issue du développement du zygote après la fécondation.
Pollinisation : transport du pollen (qui contient les gamètes mâles) depuis les anthères des étamines jusqu'au stigmate du pistil (qui contient les gamètes femelles).

L'essentiel par l'image

La reproduction des plantes à fleurs



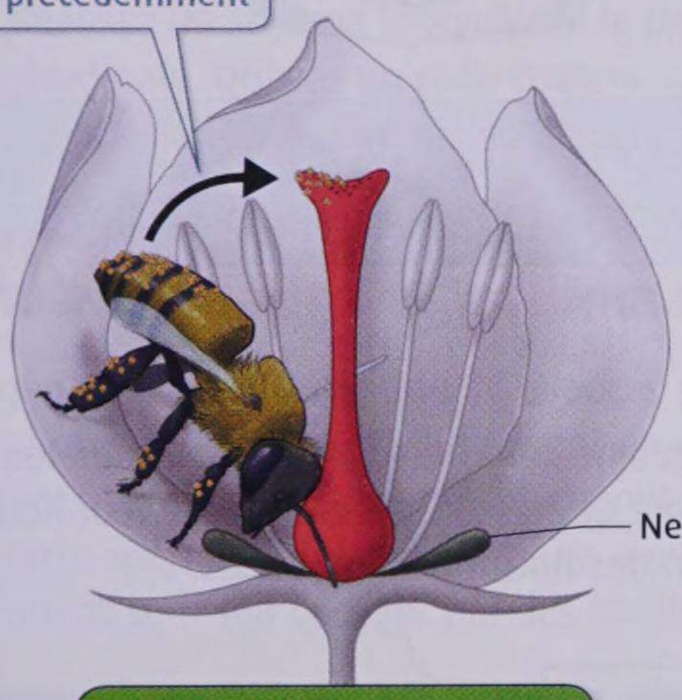
Fleur d'une plante entomogame

Signaux attractifs

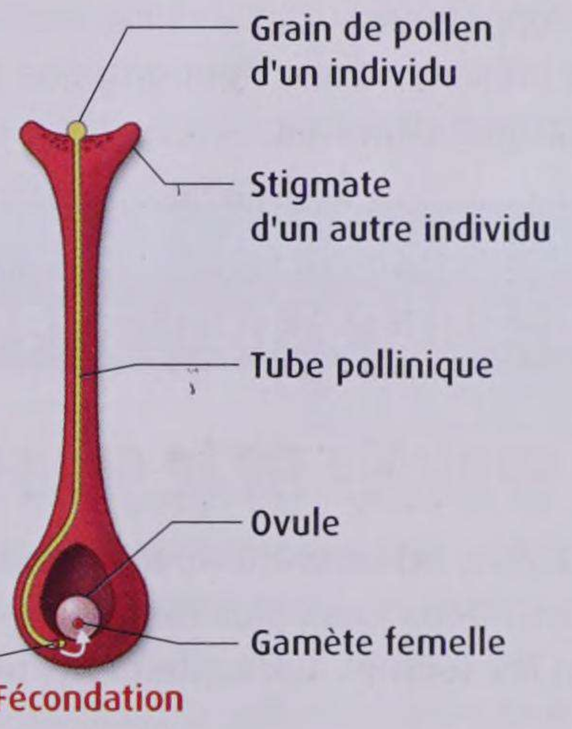
Ressources nutritives

Attraction des insectes pollinisateurs (coévolution)

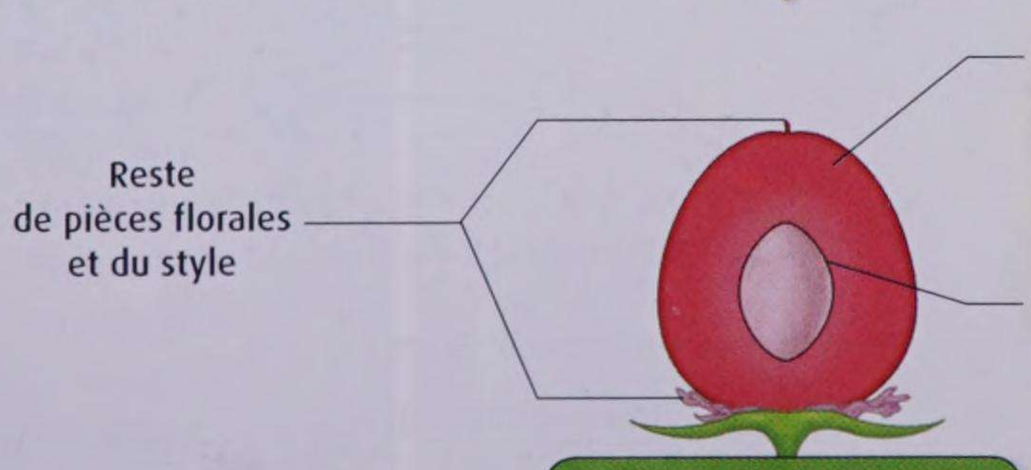
Pollen d'une fleur visitée précédemment



Pollinisation croisée



Fécondation



Formation du fruit

Ressources nutritives
Signaux attractifs

Attraction des animaux disséminateurs (coévolution)

Dispersion des fruits et des graines

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonnes réponses :

1. Parmi les pièces florales qui interviennent directement dans la reproduction, on peut citer :

a. les pétales.
b. les grains de pollen.
c. les graines.
d. le pistil.

2. À l'issue de la fécondation :

a. le grain de pollen germe.
b. l'ovaire se transforme en fruit.
c. le grain de pollen se transforme en graine.
d. chaque ovule fécondé se transforme en graine.

3. La pollinisation

a. implique souvent le pollen et le pistil de deux espèces différentes.
b. est qualifiée de « croisée » lorsqu'elle implique un insecte.
c. peut impliquer des signaux visuels, tactiles et olfactifs.

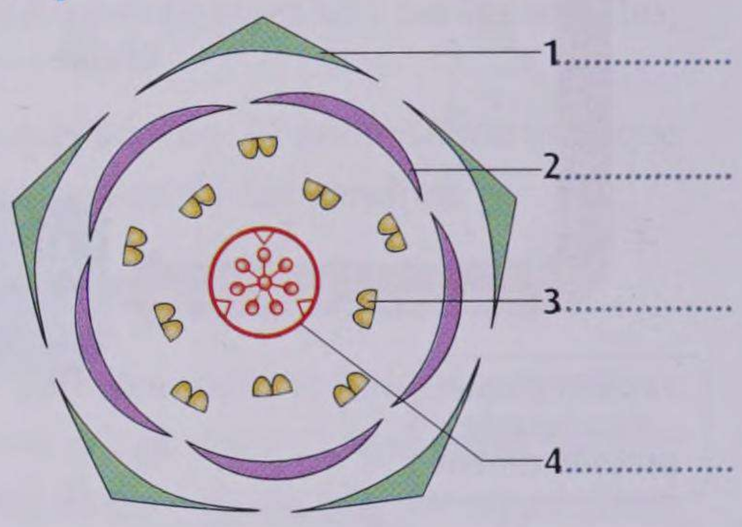
2 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Les mécanismes de la pollinisation d'une fleur résultent parfois d'un processus de coévolution.
b. Il ne peut y avoir dispersion des graines sans la collaboration entre un animal et une plante.
c. La pollinisation est contrôlée par des gènes dits du développement.
d. La présence d'une fleur entraîne toujours l'apparition d'un fruit.

3 Schéma à compléter

Recopiez le schéma ci-contre, donnez lui un titre et complétez ses légendes :



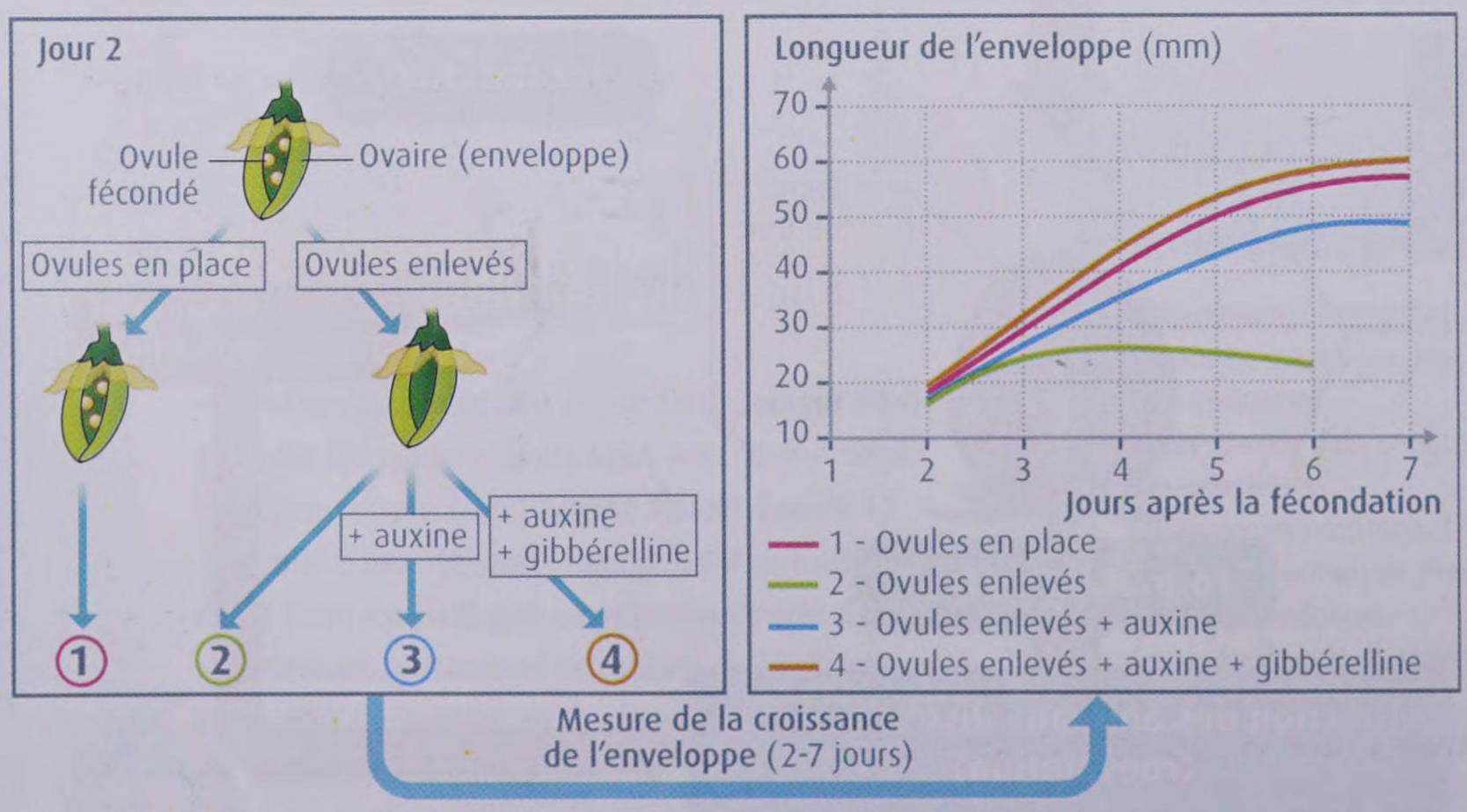
s'entraîner avec un exercice guidé

Piste

4 Le contrôle de la croissance du fruit

On réalise, au laboratoire, la fécondation de fleurs de pois. Deux jours plus tard, on ouvre les ovaires et on les soumet aux traitements présentés doc. 1.

L'auxine et la gibbérelline sont deux substances solubles produites par la plante et agissant à distance de leur lieu de synthèse : ce sont des hormones végétales.



1. Croissance de l'enveloppe de fruits de pois dans différentes conditions expérimentales.

Un peu d'aide

• Saisir des informations
– Comparez les quatre courbes de croissance obtenues.
– Déduisez-en les facteurs contrôlant la croissance de l'ovaire.

• Mobiliser ses connaissances
Rappelez comment évoluent l'ovaire et l'ovule après la fécondation

• Conclure
Proposez un modèle explicatif permettant de faire le lien entre fécondation, graines, hormones, ovaire et fruit.

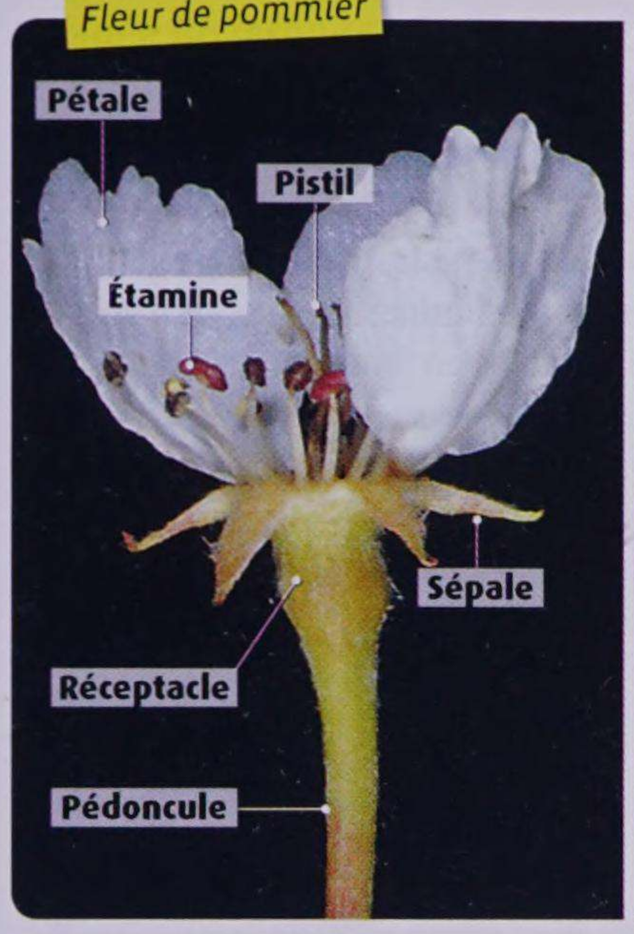
QUESTION A partir de l'analyse des résultats expérimentaux, formulez une hypothèse expliquant comment la fécondation peut entraîner la croissance du fruit, puis proposez une expérience à réaliser afin d'éprouver votre hypothèse.

5 La pomme

Traduire des informations par un schéma

La fleur de pommier présente un ovaire infère, c'est-à-dire situé sous le plan d'insertion des pièces florales (dans le réceptacle).

Fleur de pommier



Pomme en formation

Pomme (coupe longitudinale)

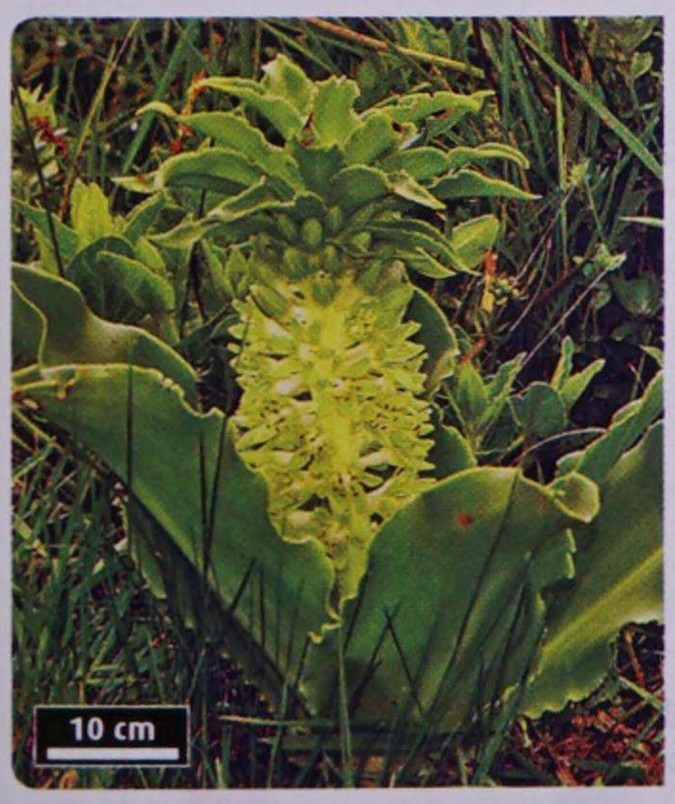
1. La pomme : de la fleur au fruit. La partie charnue du fruit (que l'on mange) provient du développement du réceptacle. Le fruit au sens strict (qui dérive de la paroi de l'ovaire) est réduit au cœur de la pomme, que l'on appelle communément le « trognon ».

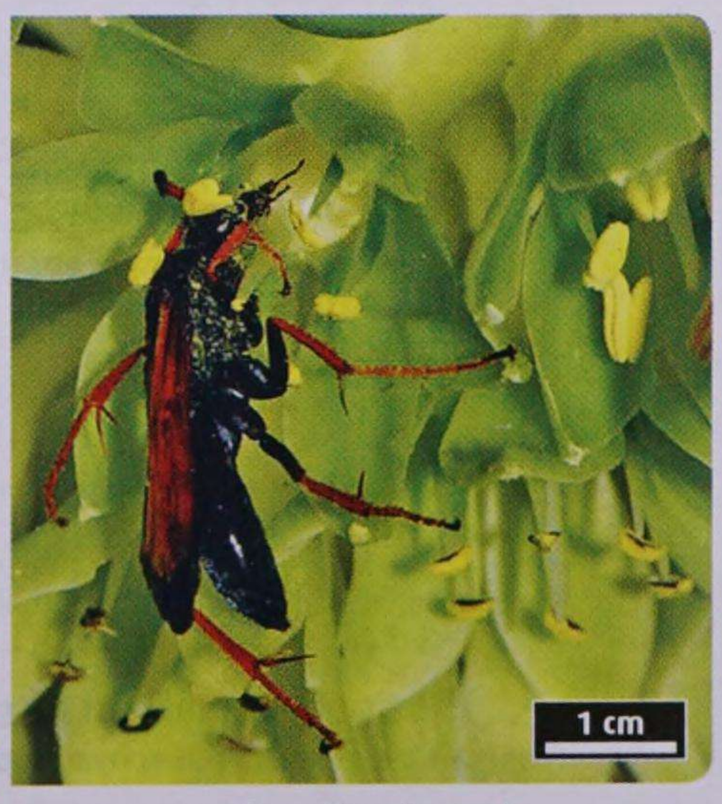
● Réalisez un schéma légendé de la fleur, de la pomme en formation et de la pomme mûre, représentées en coupe longitudinale. Utilisez un code couleur approprié pour chaque type de pièce florale, de manière à montrer la transformation de la fleur de pommier en fruit.

6 Fleurs, odeurs et pollinisation

S'informer et raisonner

Le genre *Eucomis* comprend 10 espèces de plantes originaires d'Afrique du Sud. Leurs fleurs, regroupées en grappes, se ressemblent beaucoup et produisent de grandes quantités de nectar. Pourtant, l'animal qui les pollinise varie selon les espèces. Ainsi, chez *Eucomis autumnalis*, il s'agit de guêpes du genre *Hemipepsis*. On cherche à comprendre les raisons de cette spécialisation. Pour cela, on a mesuré le nombre de guêpes approchant les fleurs de *E. autumnalis* lorsque ces dernières sont soit cachées par des feuilles, soit enfermées dans des sacs transparents empêchant la diffusion des odeurs.

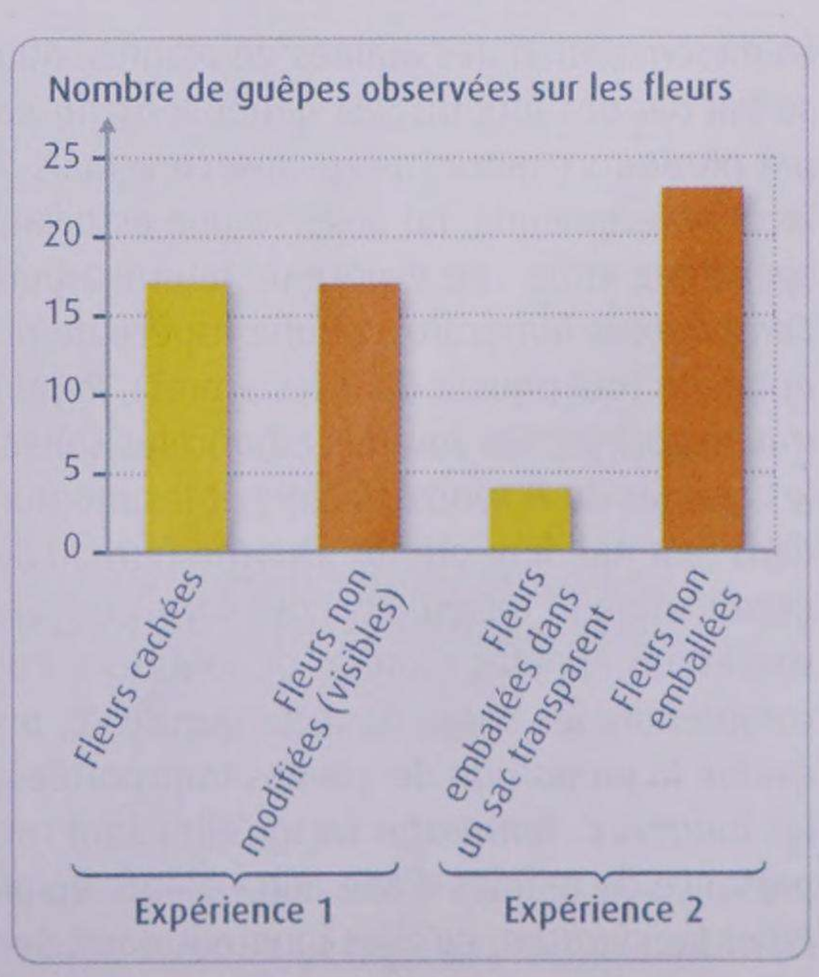




1. Fleurs d'*Eucomis autumnalis* visitées par une guêpe *Hemipepsis*

❶ Déterminez le signal qui attire l'insecte pollinisateur et mettez-le en relation avec les caractéristiques de la fleur.

❷ Formulez une hypothèse expliquant la spécificité des interactions entre les plantes du genre *Eucomis* et leurs pollinisateurs.



2. Nombre de visites des fleurs d'*E. autumnalis* par les guêpes *Hemipepsis* dans différentes conditions expérimentales.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 Nutrition des plantes à fleur et adaptation à la vie fixée

QCM

Pour chaque proposition, identifiez la bonne réponse :

1. On trouve au niveau des feuilles, des stomates qui :

a. sont constituées d'une cellule percée d'un orifice modulable.

b. permettent les échanges dans un seul sens : de l'intérieur de la plante vers le milieu extérieur.

c. peuvent s'ouvrir à tout moment de la journée pourvu qu'il y ait de la lumière.

d. sont plus ou moins ouverts en fonction des conditions du milieu extérieur.

2. Dans leur partie souterraine, les plantes à fleurs possèdent des racines, qui :

a. se développent plus ou moins profondément dans le sol.

b. puisent des matières organiques et minérales dans le sol.

c. assurent une fonction essentiellement d'ancrage dans le sol.

d. permettent l'alimentation en glucides de la plante.

3. Les poils absorbants présents sur les racines secondaires d'une plante à fleurs :

a. sont répartis sur toute la surface des racines.

b. sont en nombre et de taille variables en fonction de la richesse du sol.

c. assurent exclusivement l'absorption d'eau pour la plante.

d. permettent la formation de la sève élaborée.

4. La circulation de l'ensemble des matières dans une plante à fleurs se fait :

a. depuis les feuilles vers les racines.

b. dans des tissus spécialisés dans toute la plante.

c. dans les deux sens alternativement selon le rythme jour/nuit.

d. à partir des racines.

2 Organisation de la fleur et pollinisation par les insectes

Du fait de leur mode de vie fixée, les plantes à fleurs ont, au fil de l'évolution, développé des modalités de reproduction originales qui assurent la survie de l'espèce. Les insectes y jouent souvent un rôle fondamental.

QUESTION **Montrez comment l'organisation de la fleur permet d'assurer la reproduction de la plante dans le cas d'une pollinisation par les insectes.**

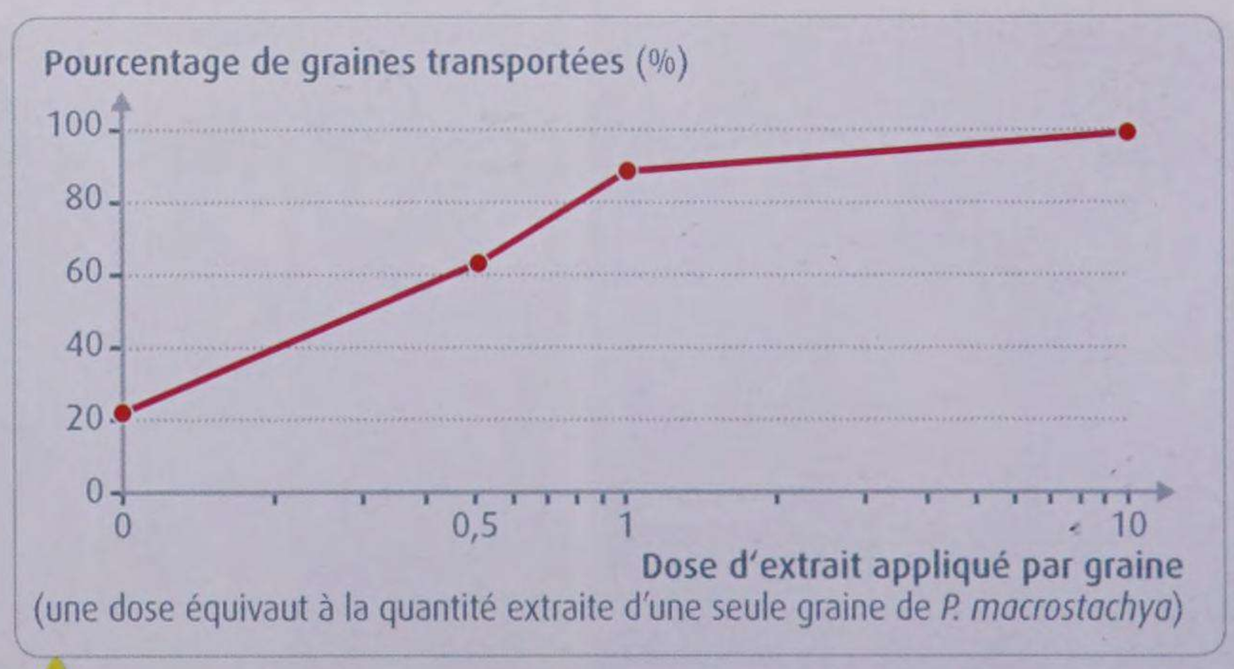
✔ Votre réponse sera structurée et illustrée de schémas judicieusement choisis. La transformation de la fleur en fruit n'est pas attendue.

exploiter des résultats expérimentaux

3 points

3 Des jardins de fourmis

La dissémination des graines de plantes, quand elle se fait par des fourmis, est généralement réalisée par plusieurs espèces de ces insectes. Mais dans la forêt amazonienne, on observe une association très spécifique entre une espèce de fourmi arboricole, *Camponotus femoratus*, et une espèce de plante épiphyte (qui pousse dans les arbres), *Peperomia macrostachya*. Ces fourmis arboricoles collectent les graines de *P. macrostachya* et les montent dans leur nid, leur offrant un riche terreau de germination et créant ainsi des sortes de jardins suspendus appelés « jardins de fourmis ». Pour comprendre les bases de cette spécificité, on évalue la proportion de graines transportées par les fourmis *C. femoratus* lorsqu'elles sont mises en présence de graines d'une autre plante épiphyte, *Piper laevigatum*, qu'elles ignorent normalement. Sur ces graines, des doses croissantes d'un extrait de graines de *P. macrostachya* ont été appliquées (doc. 1).



1 Efficacité du transport de graines en fonction de la dose d'extrait de *P. macrostachya* appliquée.

QUESTION **Après analyse du document, expliquez sur quelles bases fonctionne l'interaction spécifique présentée. Indiquez en quoi elle est bénéfique pour *P. macrostachya*, et illustre un exemple de coévolution entre deux espèces.**

résoudre un problème scientifique

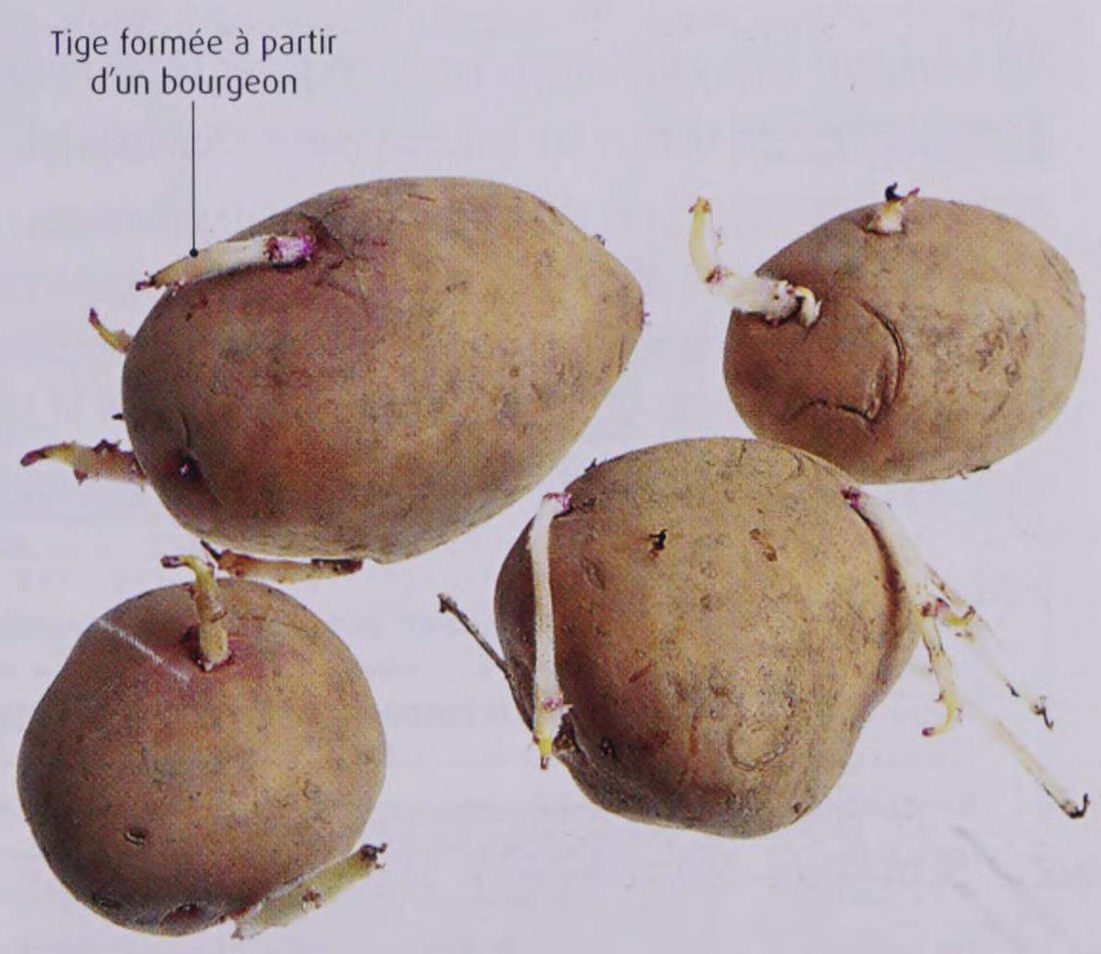
PISTE

5 points

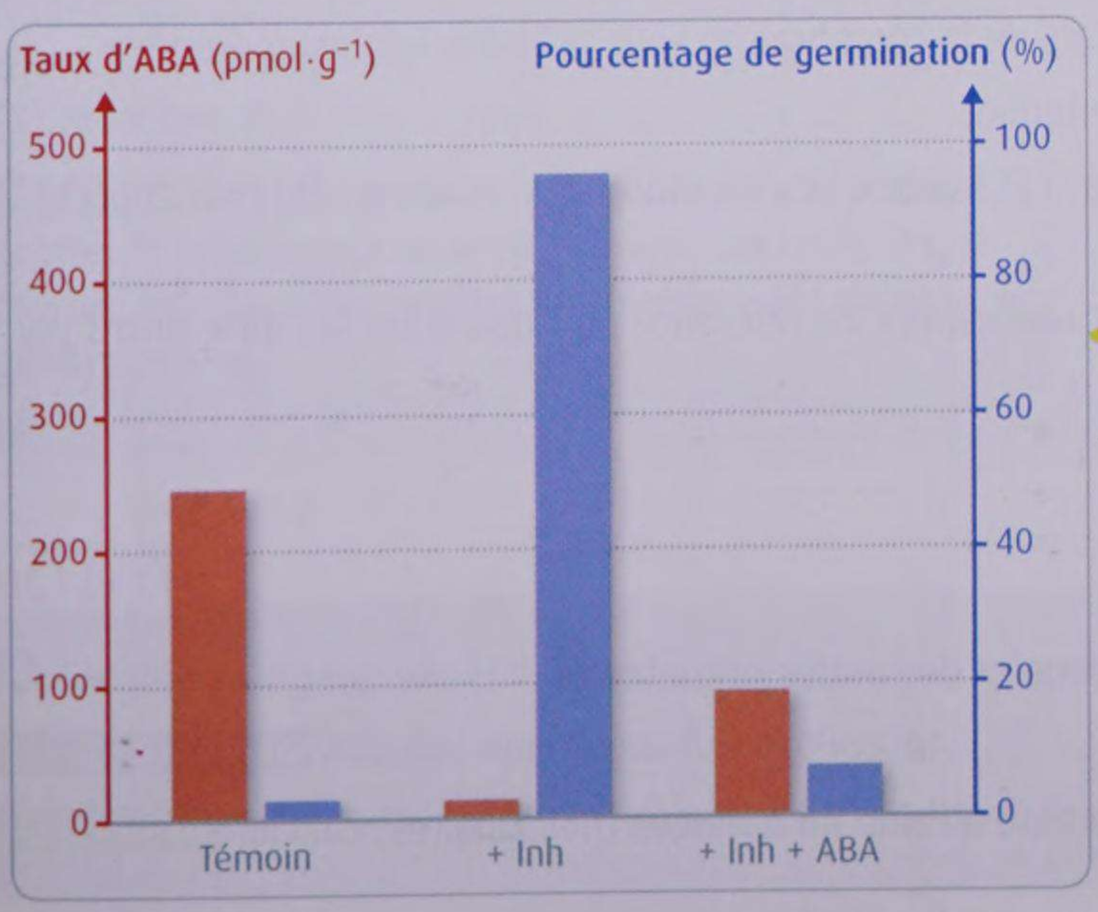
4 Les hormones végétales et le passage de la mauvaise saison

Le tubercule de pomme de terre est une tige souterraine gorgée de réserves glucidiques (doc.1). Il présente des bourgeons qui permettront, après germination, le développement d'une nouvelle plante (doc.2). Après leur formation en été, ces bourgeons sont dormants, c'est-à-dire incapables de germer ; ils ne pourront le faire que lorsque la dormance sera levée, au printemps. On étudie le rôle de l'acide abscissique (ABA) dans ce processus. L'ABA est produit par la plante et circule dans les sèves pour agir à distance de son lieu de synthèse : c'est une hormone végétale. On traite des tubercules, dont les bourgeons sont dormants, avec un inhibiteur de la synthèse d'ABA et/ou de l'ABA exogène (non synthétisé par la plante). On évalue au bout de 9 semaines, l'effet de ces traitements (doc.3).

1 Organisation d'un plant de pomme de terre. L'appareil aérien meurt à l'approche de l'hiver. Chez de nombreux végétaux, le taux d'ABA augmente sous l'effet de la diminution de la longueur des jours.



2 Tubercules de pomme de terre germés. Formés progressivement au cours de l'été, les tubercules de pomme de terre germent au printemps.



3 Taux d'ABA et germination de tubercules de pomme de terre dans différentes conditions expérimentales.
+ Inh = ajout d'un inhibiteur de synthèse d'ABA.
+Inh + ABA = ajout d'un inhibiteur de synthèse d'ABA et d'ABA exogène.

QUESTION À partir de l'exploitation des documents et de vos connaissances, déterminez les modalités de passage de la mauvaise saison d'un plant de pomme de terre, et précisez le rôle des hormones végétales dans ce processus.

1 Les liens de parenté au sein des primates

Les espèces du groupe des primates possèdent en commun le caractère « pouce opposable ». Ce groupe comprend de nombreuses espèces parmi lesquelles l'espèce humaine.

On cherche à établir les liens de parenté entre l'Homme et quelques espèces de primates actuelles à partir de données moléculaires.

ACTIVITÉ

❶ Présentez une stratégie scientifique permettant d'atteindre l'objectif posé.

Capacité évaluée Proposer une démarche de résolution.

Pour réussir Envisager les données utiles, la ou les techniques nécessaires, et la démarche à développer.

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Utilisez le logiciel Anagene pour comparer l'ADN mitochondrial de quelques espèces de primates actuels.

Capacité évaluée Utiliser les fonctionnalités d'un logiciel.

Critères d'évaluation (1) Choix et affichage des données ; (2) traitement des données cohérent avec l'objectif ; (3) fonctionnalités maîtrisées.

Pour réussir (1) Choisir de façon pertinente entre comparaison simple et comparaison avec alignement ; (2) bien choisir l'espèce de référence ; (3) utiliser les informations sur la séquence pointée.

Comparaison avec alignement

```
                    1        10        20        30        40        50        60        70        80        90
                    '''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''''|''
Traitement      0   Alignement multiple de séquences d'ADN
Identités       0   **** *   ****    *  *    *  * ***  ****    *  *                 *****  **** **** **** ***** *
Homme-ADN       0   TTCTTTCATGGGGAAGCAGATTTGGGTGCCACCCAAGTATTGACTCACCCATCAACAACCGCTATGTATTTCGTACATTACTGCCAGCCACC
Orangoutan.ADN  0   ----------G-T----------A------C----CC---C--TTT_C--G-GG--__----------------C---------A-
Bonobo.ADN      0   ------------------A----AA-----------------G----TT--CT-_T-----------------------------------
Gorille.ADN     0   ----------GA--A---------------------AG--A-----C------TT-TC------A----G---------T-------
Chimpanzé.ADN   0   ------------------A----AA--A-----T--------G-CT-TT---T-_-----------------------------------
Colobe.ADN      0   ----A-AGG------AG-AC-CAAA-AA-A---T-----C-A---T-AT-TC-C-TGC--_T------A-----G---------T-----A-
```

Comparaison des séquences d'ADN mitochondrial des primates étudiés. Les 90 premiers nucléotides sur 345 sont représentés.

ACTIVITÉ

❸ À partir de la capture d'écran ci-dessus, présentez les résultats de la comparaison sous la forme la plus appropriée.

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes de représentation.

Critères d'évaluation (1) Pertinence du mode de représentation ; (2) lisibilité et exactitude des résultats ; (3) soin apporté à la communication.

Pour réussir (1) Choisir un tableau ou un graphique ; (2) choisir une espèce de référence puis quantifier les différences par rapport à cette référence ; (3) indiquer légendes et titre.

ACTIVITÉ

❹ Exploitez vos résultats pour conclure sur la parenté de l'Homme et des autres primates.

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Énoncer le principe d'établissement de liens de parenté à l'aide de données moléculaires ; conclure.

Thème 2 : Relation entre organisation et mode de vie des plantes à fleurs

2 L'identification d'un organe végétal

Un bocal contenant des fragments végétaux est retrouvé dans une armoire. Leur forme cylindrique et leur dimension permet de supposer qu'il s'agit de fragments de tige ou de racine.

On se propose d'identifier ces fragments en réalisant une coupe transversale de l'un d'entre eux, colorée au carmin-vert d'iode.

ACTIVITÉ

❶ En utilisant les données de la fiche annexe, justifiez l'intérêt de réaliser une telle coupe pour répondre au problème posé.

Capacité évaluée Comprendre la manipulation.

Pour réussir Mettre en relation les données de la fiche annexe et le problème posé.

Fiche annexe. Dans une tige en coupe transversale, xylème et phloème sont superposés (le xylème est plutôt situé vers l'intérieur et le phloème vers l'extérieur de la coupe), et les éléments du xylème forment un triangle dont la pointe est dirigée vers le centre de la tige. Dans une racine en coupe transversale, xylème et phloème sont disposés en alternance sur un cercle, et la pointe du triangle formé par les éléments du xylème est dirigée vers l'extérieur.

Les figurés conventionnels sont : ▼ Xylème ◠ Phloème

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Réalisez une coupe transversale de l'objet à identifier, colorez-la et montez-la selon le protocole fourni en vue d'une observation microscopique. Utilisez le microscope pour centrer la préparation sur une zone judicieusement choisie.

Capacité évaluée Réaliser une préparation et utiliser le microscope.

Critères d'évaluation	Pour réussir
Qualité de la préparation microscopique	• Réaliser une coupe très fine • Respecter le protocole de coloration
Réalisation des réglages et utilisation des objectifs	• Régler l'éclairage et le diaphragme • Choisir l'objectif adapté
Exploration de la préparation	Centrer sur des éléments conducteurs

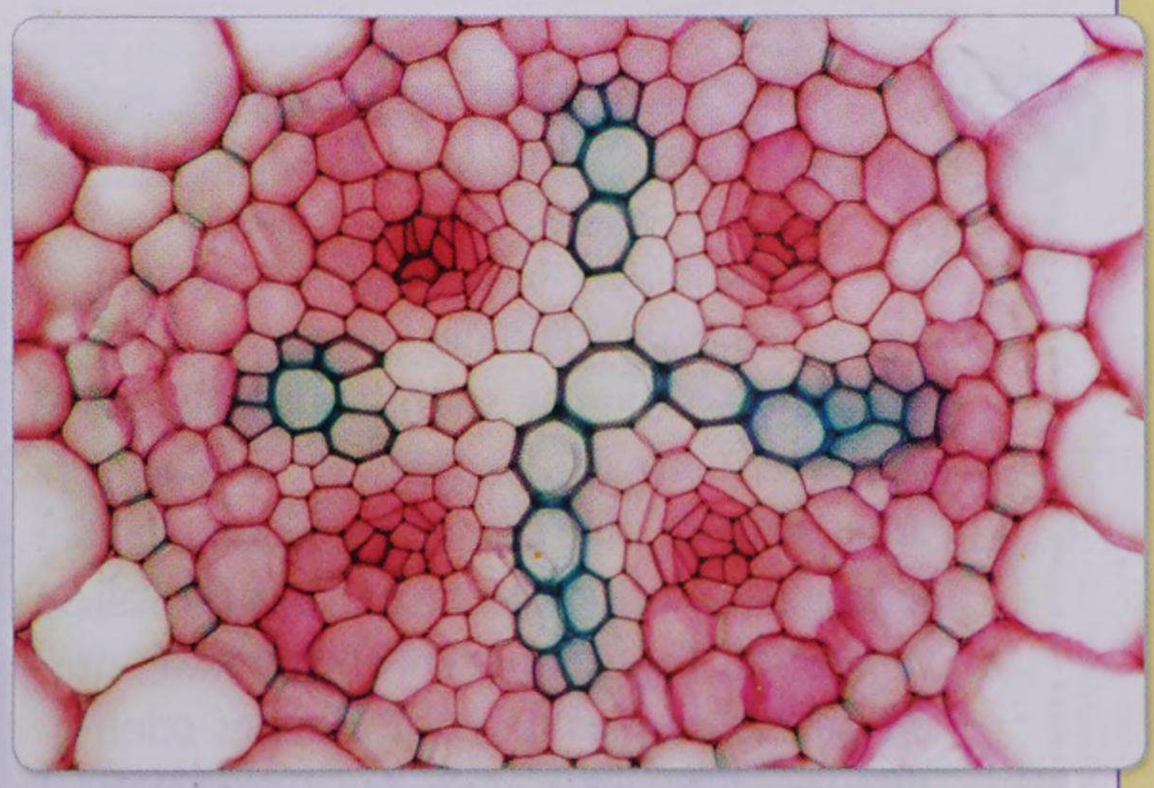
ACTIVITÉ

❸ Réalisez un schéma de la coupe ci-contre en utilisant les figurés conventionnels (voir fiche annexe).

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes de représentation.

Critères d'évaluation (1) Sélection des informations utiles, respect des symboles proposés ; (2) lisibilité du schéma et clarté de la mise en forme ; (3) exactitude des légendes ; (4) rédaction d'un titre adapté.

Pour réussir (1) Faire apparaître xylème et phloème ; (2) centrer le schéma sur la page et tracer des traits fins au crayon ; (3) identifier xylème et phloème ; (4) indiquer le grossissement.



Portion de coupe transversale d'un organe végétal vue au MO (x 100).

ACTIVITÉ

❹ Identifiez l'organe végétal étudié.

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Préciser la disposition du xylème et/ou du phloème ; se référer à la fiche annexe pour identifier l'organe étudié.

ATELIERS D'EXPLORATION

LE COIN DU LABO — Des poils très absorbants

Pour montrer l'organisation et le rôle des poils absorbants des racines, voici quelques manipulations.

1. Préparation des cultures

– Mettez à germer une dizaine de graines (radis, blé...) sur du papier absorbant dans une boîte de Pétri, pendant environ 48 h.

– Dès que la radicelle apparaît, répartissez les graines sur deux petites grilles (dont les mailles devront laisser passer la racine).

– Placez chacune des grilles sur un petit bécher remplis à ras bord d'eau.

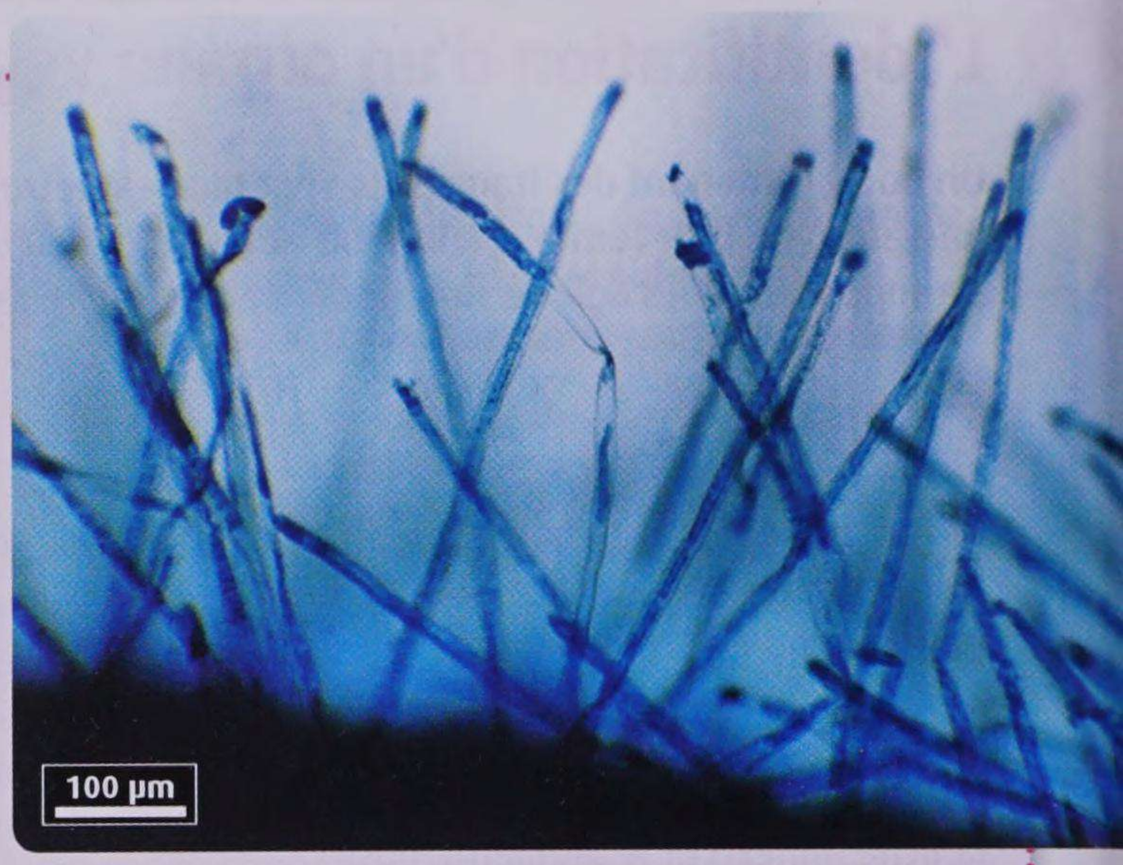
2. Manipulations et observations

– Au bout de quelques jours, lorsque la zone pilifère est bien formée, prélevez-en délicatement un fragment.

– Déposez-le entre lame et lamelle dans une goutte d'eau distillée et observez-le au microscope.

– Ajoutez ensuite quelques gouttes de bleu de méthylène dans l'eau d'un des deux béchers.

– Au bout de 10 minutes, prélevez délicatement un fragment de zone pilifère et réalisez une nouvelle observation microscopique.



Poils absorbants d'une racine plongée dans une solution de bleu de méthylène.

ACTIVITÉS

❶ Réalisez un dessin d'observation légendé et titré d'une portion de la zone pilifère du premier prélèvement.

❷ Précisez la (les) différence(s) observée(s) lors de l'observation du second prélèvement.

❸ Concluez quant au rôle des poils absorbants.

MÉTIER — Travailler dans un organisme de recherche

L'Institut national de la recherche agronomique (INRA) est l'un des principaux organismes de recherche scientifique publique français. Premier institut de recherche agronomique en Europe, deuxième dans le monde, il mène des recherches sur l'alimentation, l'agriculture et l'environnement au travers de plus de 50 disciplines scientifiques différentes. Son fonctionnement repose sur une multitude de métiers, et en particulier: les chercheurs, les ingénieurs et assistants ingénieurs, enfin les techniciens et agents techniques.

POUR VOUS GUIDER onisep

- www.inra.fr/ (tapez « les hommes et les femmes » et « les recherches »;
- www.onisep.fr

Étude de la production herbeuse.

ACTIVITÉS

❶ Réalisez une fiche sur l'un des métiers de l'INRA indiquant le cursus scolaire et universitaire y menant, les compétences requises pour ce métier, les domaines de travail...

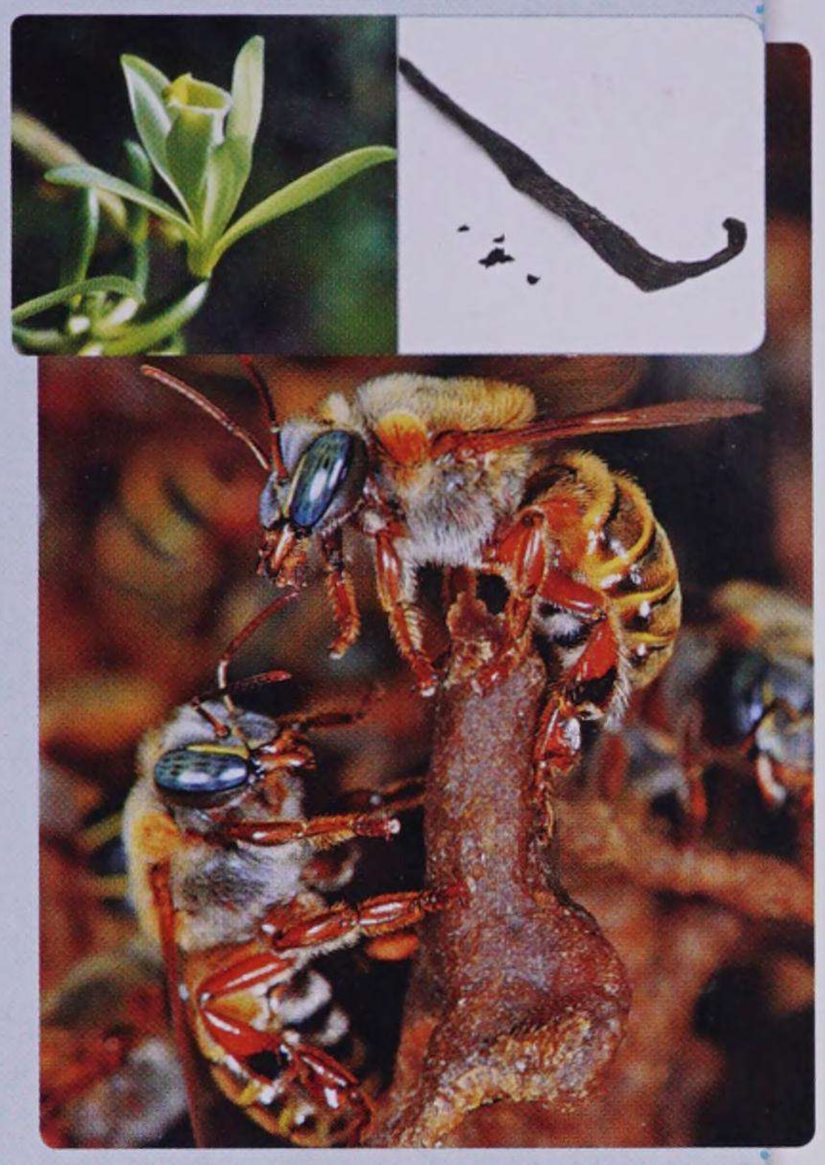
❷ Trouver des disciplines scientifiques de l'INRA en rapport avec le (les) thème(s) étudiés en Terminale S.

ENQUÊTE

Les contraintes de la coévolution : l'exemple de la vanille

La gousse de vanille est le fruit d'une orchidée *(Vanilla planifolia)* originaire du Mexique. Dans ce pays, la pollinisation est assurée par une petite abeille du genre *Melipone*. Cette abeille, endémique de l'Amérique centrale et du Sud, est la seule capable de polliniser la fleur : sa petite taille lui permet de se faufiler dans la corolle de la fleur (les sacs polliniques de l'orchidée se collent sur sa tête et lui permettent de féconder une autre fleur).

Au début du XIXe siècle, la vanille fut introduite à la Réunion, mais les fleurs donnaient très rarement une gousse (moins d'une fleur sur cent). Aujourd'hui, elle est cultivée dans plusieurs régions du monde.



Melipone et fleur de *Vanilla planifolia*.

ACTIVITÉS

❶ Indiquez pour quelle raison la pollinisation de la vanille est naturellement très rare.

❷ Faites des recherches pour expliquer comment l'Homme produit aujourd'hui de la vanille, s'affranchissant ainsi de la coévolution vanille-mélipone.

POUR VOUS GUIDER

- www.snv.jussieu.fr/vie/ (recherchez « vanille »)
- http://nature.jardin.free.fr/ (recherchez « vanille » puis « fécondation »).

INFORMATIQUE

Évaluer la surface foliaire d'une plante herbacée

http://pedagogie.ac-amiens.fr/svt/info/logiciels/Mesurim2/Telecharge.htm

À cette adresse, vous pouvez télécharger le logiciel Mesurim afin d'évaluer la surface foliaire d'une plante herbacée.

1. Préparation

– Récoltez la totalité d'une plante herbacée dont les feuilles sont de grande taille et en petit nombre (pissenlit, primevère...).

– Pesez la plante (sans la terre) et mesurez son volume (en la plongeant dans une éprouvette remplie d'eau).

– Comptez le nombre de ses feuilles.

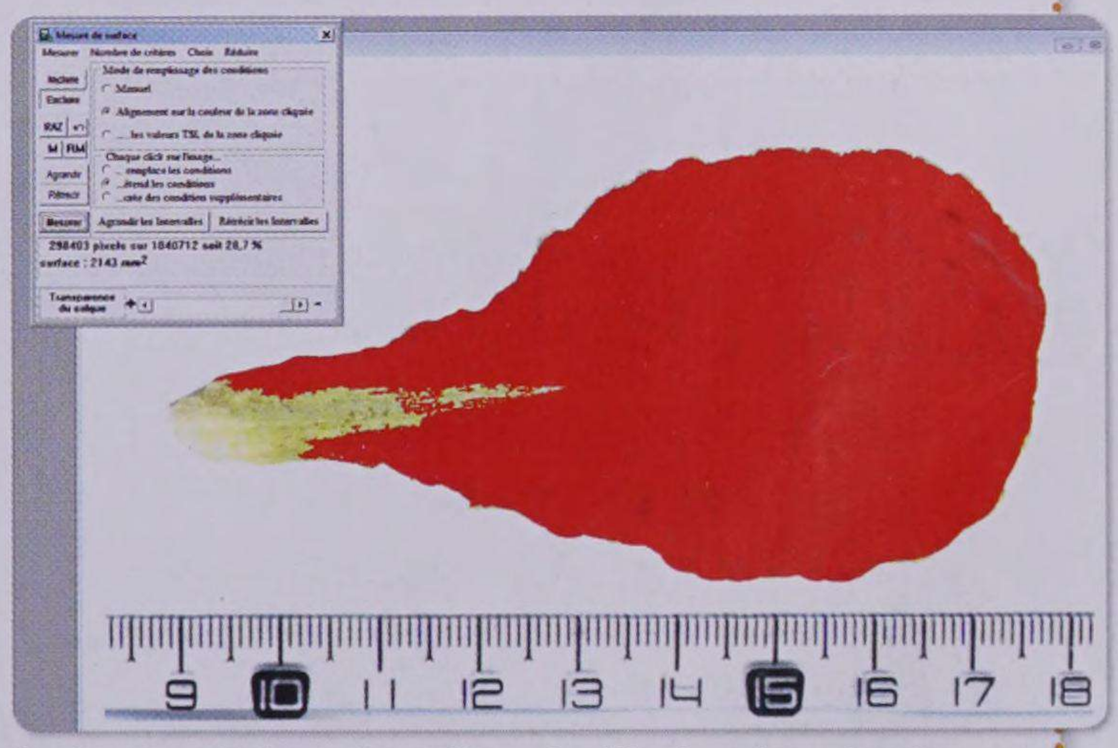
– Détachez une feuille de taille moyenne.

2. Mesure de la surface d'une feuille

– Placez sur la vitre d'un scanner la feuille à plat et une règle graduée.

– Lancez le logiciel Mesurim et réalisez la capture d'image.

– La mesure de la surface de la feuille se fait en 3 étapes : mise à l'échelle de la photo, colorisation de la feuille puis mesure de la surface de la zone colorisée.



Évaluation de la surface d'une feuille de primevère à l'aide du logiciel Mesurim.

ACTIVITÉS

❶ À l'aide du résultat obtenu pour une feuille avec Mesurim, évaluez la surface foliaire totale de la plante choisie.

❷ Rapportez cette surface d'échange à la masse puis au volume de la plante entière.

❸ Comparez l'importance relative des surfaces d'échanges chez la plante à fleurs et chez l'Homme (recherchez sur Internet la surface d'échange pulmonaire, la masse et le volume corporel).

THÈME 3

Le domaine continental et sa dynamique

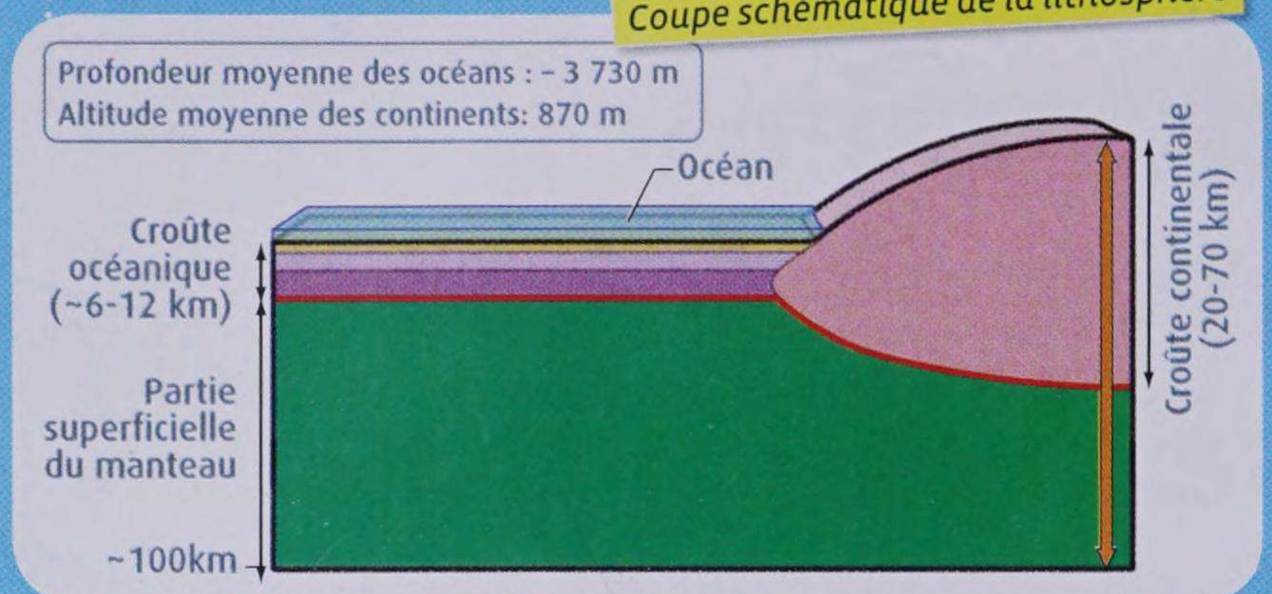
MOBILISER SES ACQUIS p. 140

1. Caractérisation du domaine continental p. 143
2. La formation des chaînes de montagnes p. 163
3. La production de nouveaux matériaux continentaux p. 181
4. La disparition des reliefs p. 199

Scène de vie au Népal. En arrière-plan, l'Annapurna culmine à 8091 mètres.

1. Quelles sont les roches caractéristiques des enveloppes solides de la Terre ?

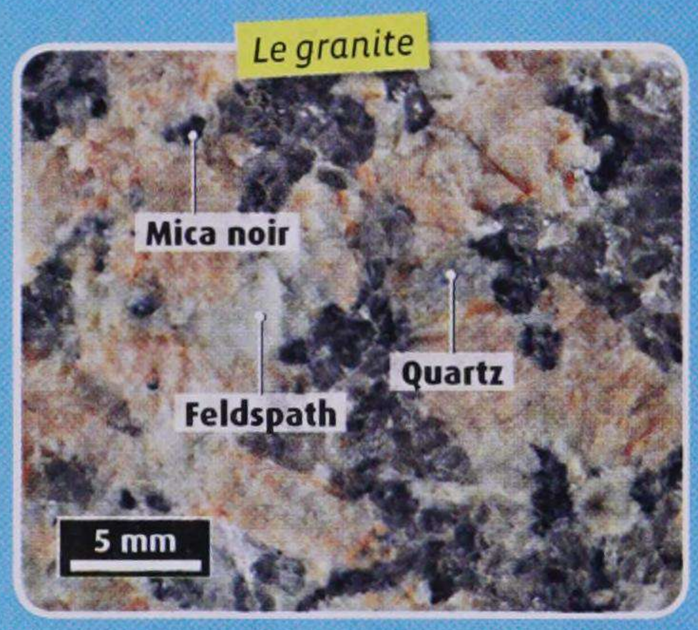
Coupe schématique de la lithosphère



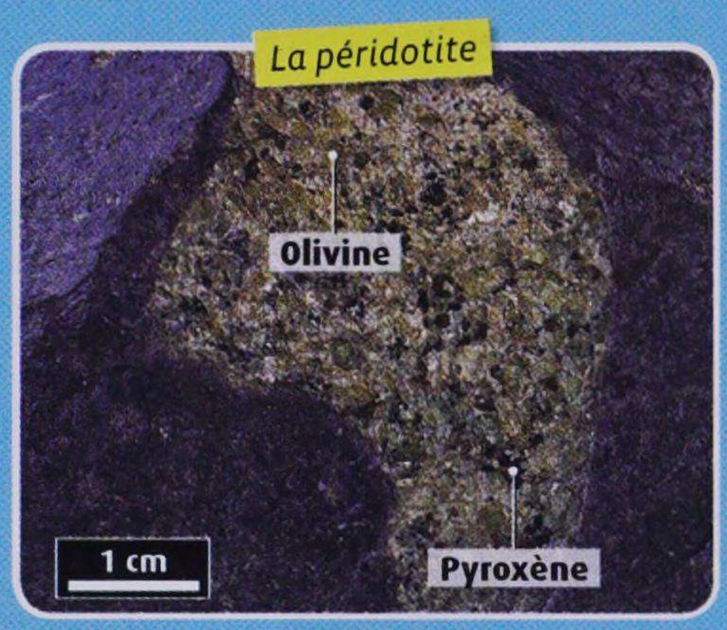
Le basalte

Le gabbro

Le granite



La péridotite



mots clés

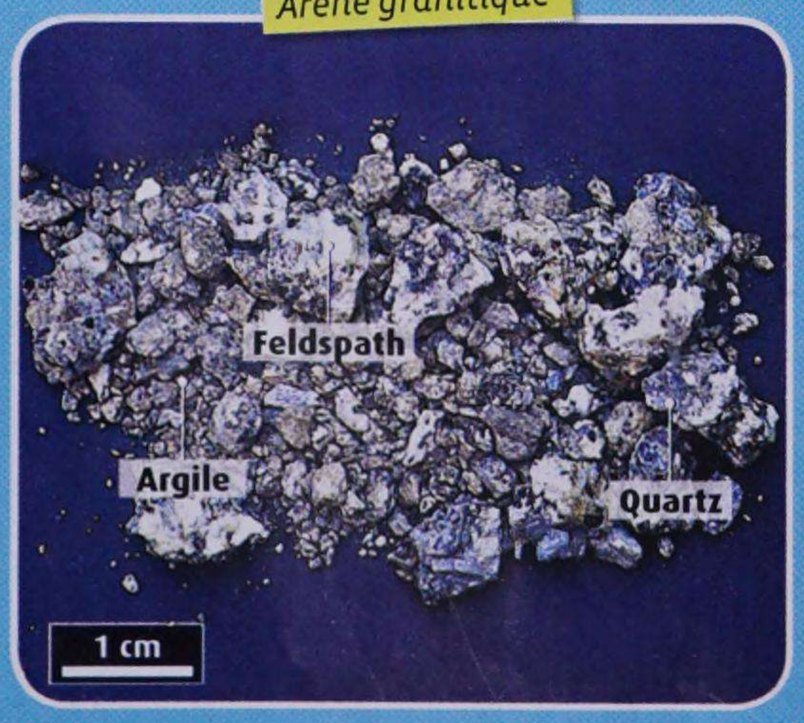
Structure grenue : Structure caractéristique des roches magmatiques plutoniques : la roche est constituée d'un assemblage de minéraux tous visibles à l'œil nu.

Structure microlitique : Structure caractéristique des roches magmatiques volcaniques : la roche est constituée de minéraux invisibles à l'œil nu (les microlites) et de verre.

1. **Quelles roches appartiennent à la croûte continentale, à la croûte océanique et au manteau ?**
2. **Quelles roches ont la même composition minéralogique mais des structures différentes ? Comment l'expliquer ?**

2. Comment évolue en surface la croûte continentale ?

Arène granitique



Évolution de la teneur en minéraux au cours de l'altération d'un granite sous l'action de l'eau

Quelques minéraux \ Type de granite	Sain	Altéré (arène granitique)
Quartz	25 %	27 %
Feldspath	54,5 %	10,3 %
Argile	0%	44,4%

Érosion des roches et transport des produits de l'érosion

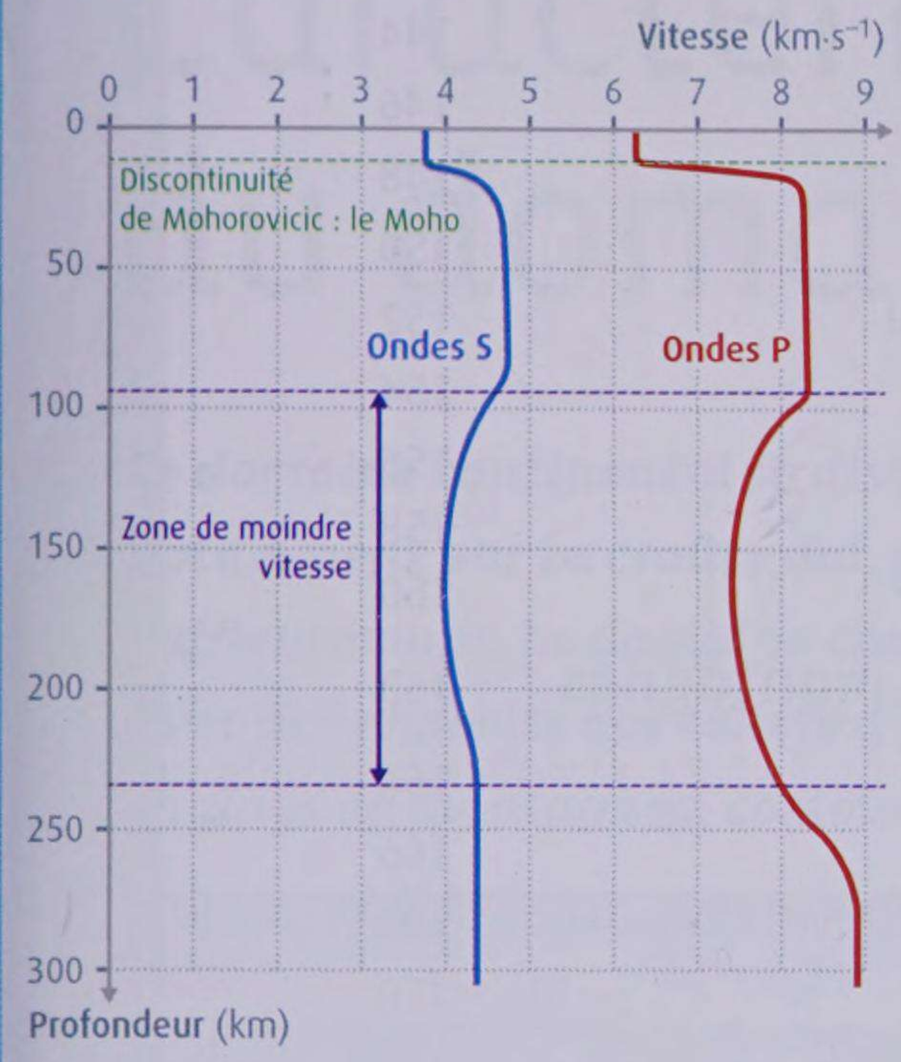
1. **Quel nouveau minéral se forme avec l'altération des minéraux du granite ?**
2. **Indiquez la légende correspondant à chaque numéro sur le schéma de droite.**
3. **Quel est le devenir des produits de l'érosion ?**

Sédiment : dépôt meuble d'éléments de taille variable provenant de roches préexistantes (débris issus de l'érosion), d'organismes (débris de coquilles) ou encore d'une précipitation chimique, ayant subi un transport (notamment par l'eau).

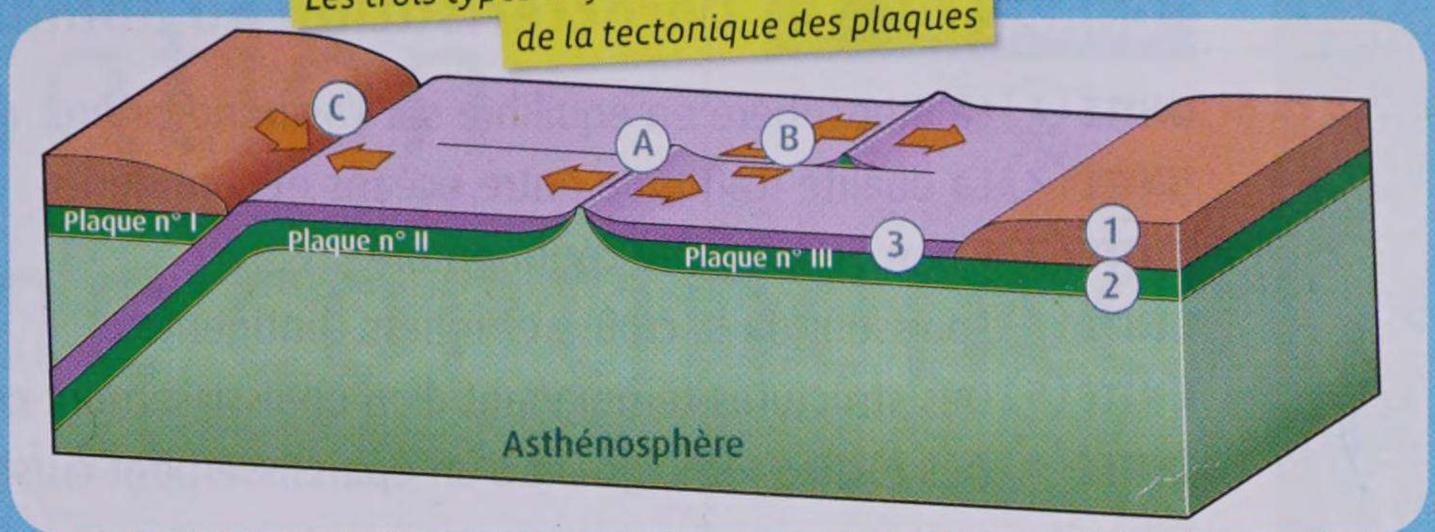
Sédimentation : dépôt, après transport, d'éléments provenant de roches préexistantes (produits de l'érosion, débris volcaniques), d'organismes, ou résultant d'une précipitation chimique.

3. Quels sont les mouvements relatifs des plaques lithosphériques ?

Vitesse des ondes sismiques P et S en fonction de la profondeur en milieu océanique



Les trois types de frontières de plaques dans le modèle de la tectonique des plaques



Ductile : se dit d'une roche ou d'une enveloppe terrestre qui, soumise à des contraintes, se déforme sans casser.
Dorsale : lieu de formation de la croûte océanique par fusion partielle des péridotites, aboutissant à la mise en place d'une jeune lithosphère océanique.
Plaque lithosphérique : plaque constituée de lithosphère océanique et/ou continentale, qui a un comportement rigide, qui accumule la déformation au niveau de ses frontières et qui est animée d'un mouvement de rotation à la surface du globe. Des mouvements relatifs d'une plaque par rapport à une autre peuvent être définis.
Rigide : se dit d'une roche ou d'une enveloppe terrestre qui, soumise à des contraintes, se déforme en cassant.

1 **Replacez sur le profil de vitesse des ondes sismiques les termes : croûte, lithosphère, asthénosphère, comportement rigide, comportement ductile.**

2 **Que révèle la présence des ondes S sur l'état des roches du manteau ?**

3 **Où se forme la lithosphère océanique ? Quelle roche subit la fusion partielle ?**

4 **Indiquez la légende correspondant à chaque numéro et à chaque lettre sur le schéma.**

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 3

La répartition bimodale des altitudes suggère des matériaux différents pour les océans et les continents. Le **gabbro** (roche magmatique plutonique) et le **basalte** (roche magmatique volcanique) sont les deux principales roches de la **croûte océanique**. Leurs compositions chimique et minéralogique sont identiques car elles sont issues d'un même magma. Le gabbro est issu d'un refroidissement lent en profondeur, sa structure est grenue, le basalte est issu d'un refroidissement rapide en surface, sa structure est microlitique.

Bien que la **croûte continentale** soit constituée de roches diverses, le **granite** est une roche représentative de cette enveloppe. C'est une roche magmatique plutonique de structure grenue.

Le **manteau** terrestre est constitué de péridotites. Cette enveloppe de la Terre est à l'état solide. Localement, par exemple au niveau des dorsales, un très faible volume de **péridotites** peut entrer en fusion partielle.

L'ensemble formé de la croûte et du manteau jusqu'à environ 100 km de profondeur constitue la **lithosphère**. Elle a un comportement **rigide** qui se distingue du comportement plus **ductile** de l'**asthénosphère**. La nature de la croûte permet de distinguer la lithosphère continentale et la lithosphère océanique. Les plaques lithosphériques, en rotation sur la sphère terrestre, se déplacent relativement les unes par rapport aux autres par des mouvements de divergence, de convergence ou par des mouvements décrochants. Dorsales océaniques, failles transformantes et zones de subduction ou de collision sont différents types de frontières de plaques.

Les roches en surface sont soumises, en particulier, à l'action de l'eau : elles s'érodent et les minéraux de ces roches sont altérés. Des débris ou produits de l'**érosion** peuvent s'accumuler sur place ou être transportés par les eaux de ruissellement puis par les cours d'eau. Ils finissent par se déposer par **sédimentation** et deviennent alors des **sédiments**.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Caractérisation du domaine continental 143

UNITÉ 1 La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère 144
UNITÉ 2 La dualité d'altitude entre océans et continents 146
UNITÉ 3 L'âge de la croûte continentale 148
UNITÉ 4 Épaisseur de la croûte et reliefs continentaux 150
UNITÉ 5 Des structures témoignant d'un épaississement crustal 152
UNITÉ 6 Des roches témoignant d'un épaississement crustal 154
Bilan des unités 156
L'essentiel 158
Exercices 160

CHAPITRE 2 La formation des chaînes de montagnes 163

UNITÉ 1 Des lambeaux de lithosphère océanique 164
UNITÉ 2 Des vestiges de marges continentales 166
UNITÉ 3 Des transformations minéralogiques 168
UNITÉ 4 Un scénario de formation d'une chaîne de montagnes 170
UNITÉ 5 Le moteur de la subduction 172
Bilan des unités 174
L'essentiel 176
Exercices 178

CHAPITRE 3 La production de nouveaux matériaux continentaux 181

UNITÉ 1 Le volcanisme des zones de subduction 182
UNITÉ 2 L'origine du magma dans les zones de subduction 184
UNITÉ 3 L'hydratation du manteau dans les zones de subduction 186
UNITÉ 4 La production de roches plutoniques dans les zones de subduction 188
UNITÉ 5 La fabrication de la croûte continentale 190
Bilan des unités 192
L'essentiel 194
Exercices 196

CHAPITRE 4 La disparition des reliefs 199

UNITÉ 1 L'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes 200
UNITÉ 2 Altération et érosion des reliefs 202
UNITÉ 3 Des processus tectoniques participant à la disparition des reliefs 204
UNITÉ 4 Le recyclage de la lithosphère continentale 206
Bilan des unités 208
L'essentiel 210
Exercices 212
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 214
OBJECTIF BAC Évaluation des compétences expérimentales 216
ATELIERS D'EXPLORATION LE COIN DU LABO – SCIENCES ACTUALITÉ – MÉTIER – HISTOIRE DES SCIENCES 218

CHAPITRE 1

Caractérisation du domaine continental

Le domaine continental se distingue du domaine océanique notamment par sa croûte qui, pour l'essentiel, est à l'affleurement. Le domaine continental est ainsi émergé, avec par endroits des reliefs d'altitude importante : les chaînes de montagnes, comme les Alpes ou l'Himalaya.

Vue aérienne des calanques de Piana (Corse).

Comment expliquer la dualité d'altitude océans - continents ? Quelles sont les caractéristiques propres au domaine continental ?

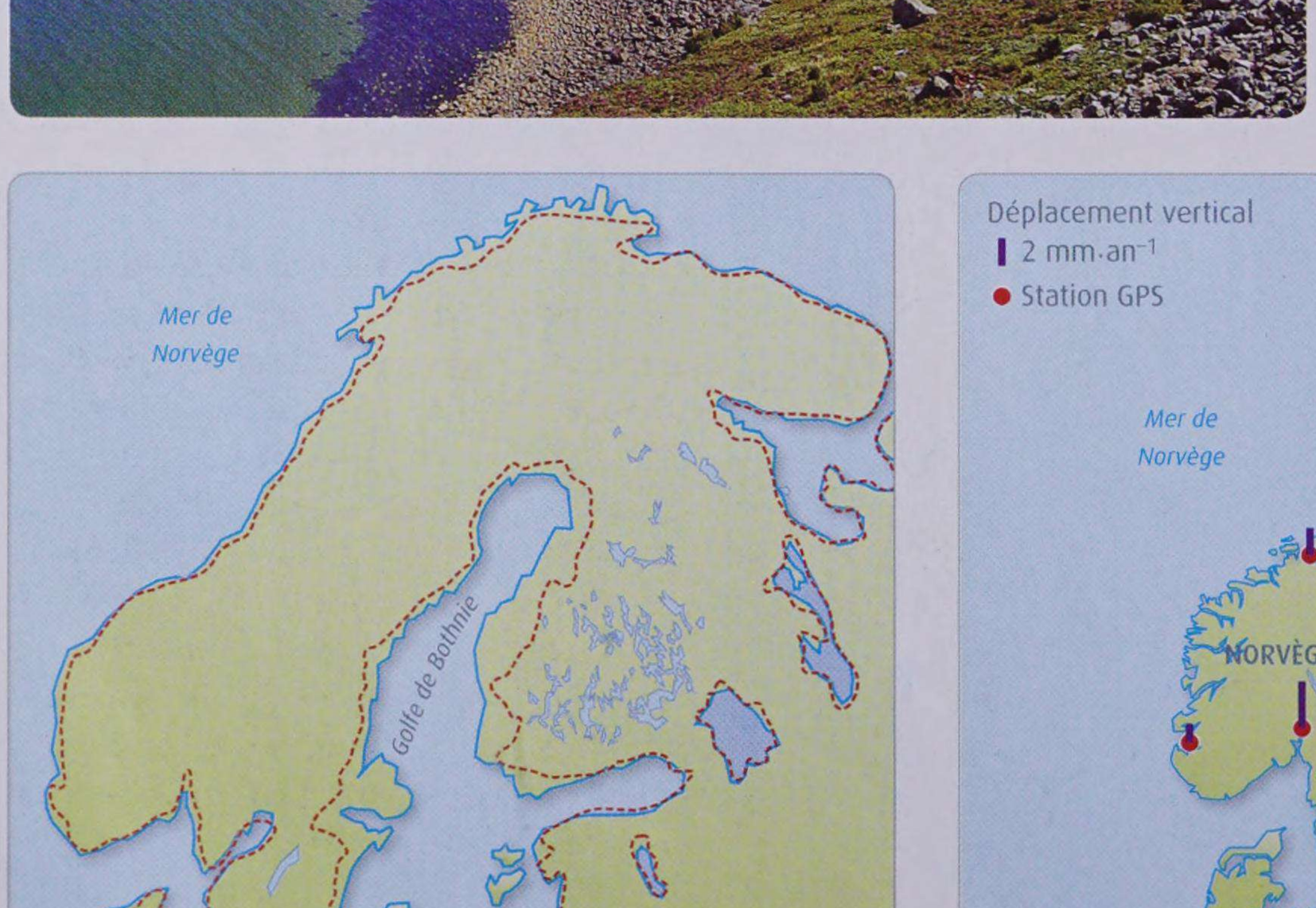
UNITÉ 1

La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère

Parmi les observations qui ont conduit A. Wegener à proposer, en 1912, la théorie de la dérive des continents, certaines témoignaient de mouvements verticaux des continents. On sait aujourd'hui que ces mouvements concernent toute la lithosphère.

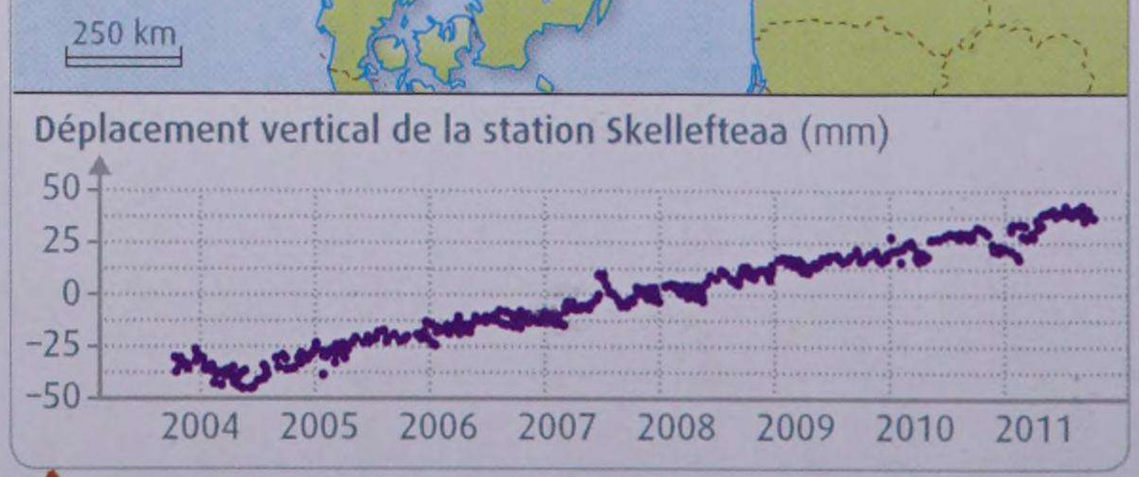
Comment la mobilité verticale de la lithosphère peut-elle être mise en évidence et expliquée ?

Mettre en évidence des mouvements verticaux



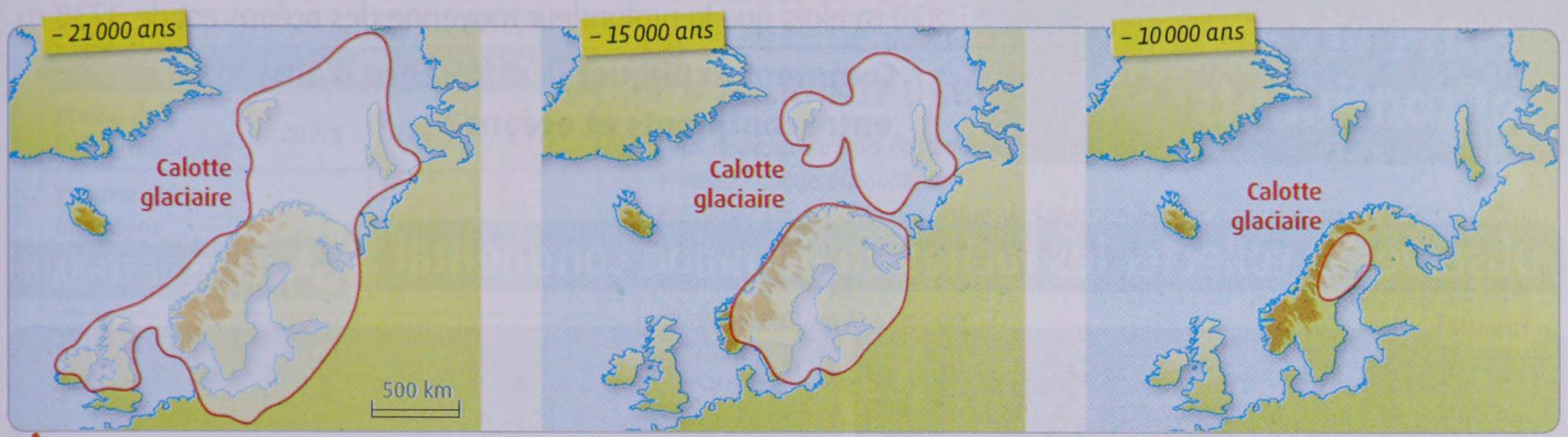
1 Un tracé de côte en Écosse (baie de Gruinard). Au-dessus du rivage actuel, on repère un ancien rivage (paléorivage) enherbé.

2 Comparaison du rivage actuel et du rivage il y a 5 000 ans en Scandinavie. Dans le golfe de Bothnie, des traces de l'occupation de bandes côtières par des pêcheurs et des agriculteurs ont été mises au jour. Les restes les plus anciens (5 000 ans av. J.-C.) sont localisés 150 m au-dessus du niveau de la mer. Ceux datant de 1 700 ans av. J.-C. et de 500 ans av. J.-C. sont respectivement situés 30 m et 15 m au-dessus du rivage actuel.

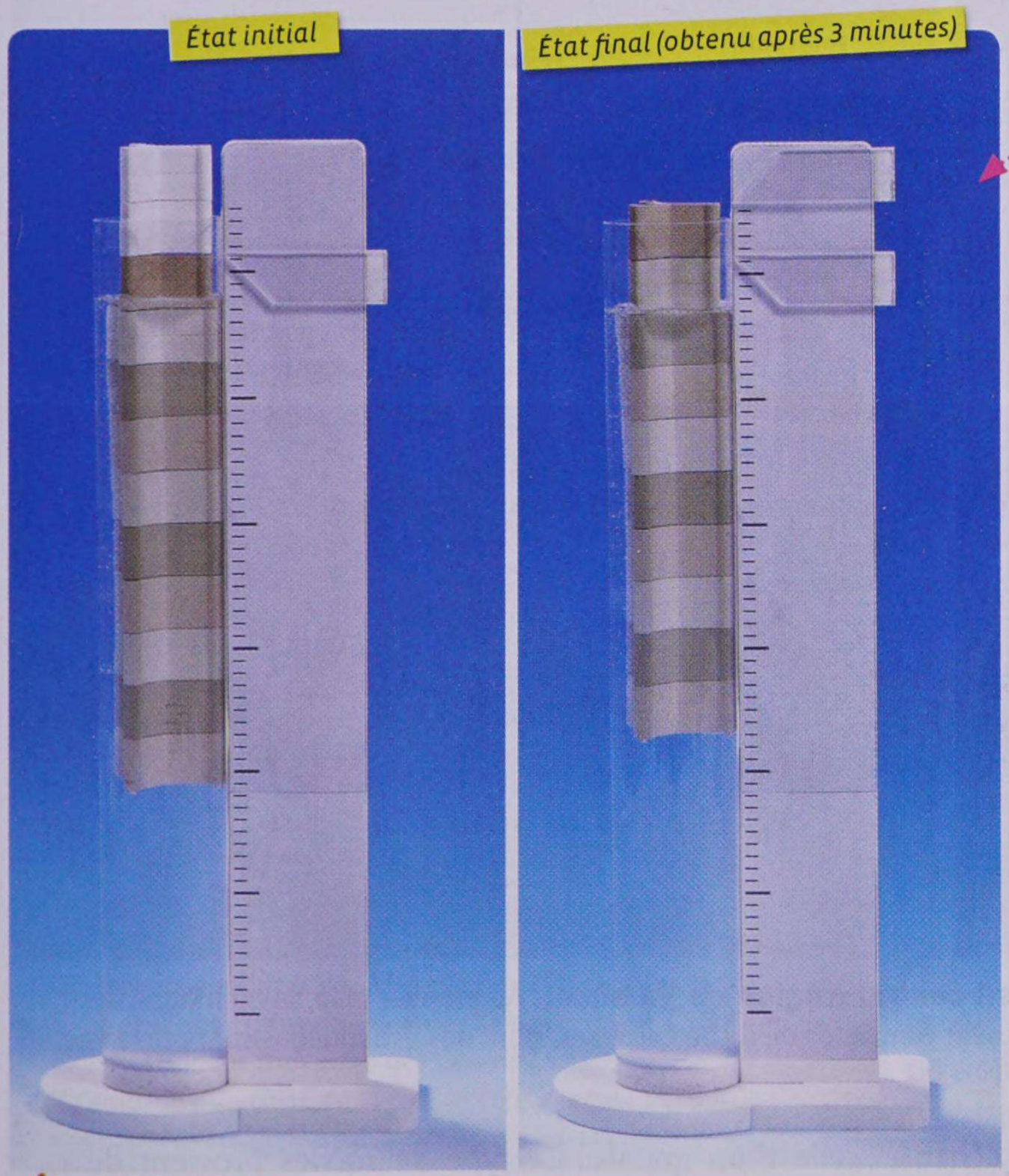


3 Déplacement vertical moyen actuel de différentes stations GPS en Scandinavie. Le système GPS permet de suivre au jour le jour la position de stations permanentes et de mettre en évidence leurs déplacements.

Comprendre l'équilibre isostatique



4 Reconstitution de l'évolution de la calotte glaciaire scandinave. Des formes d'érosion et des sédiments périglaciaires témoignent de la présence d'une ancienne calotte glaciaire en Scandinavie. Il y a 20 000 ans, l'épaisseur des glaces atteignait plusieurs kilomètres.



5 Une modélisation analogique du mouvement vertical de la Scandinavie.

JE MANIPULE

On dispose d'un bac transparent contenant un fluide visqueux et d'un bloc en plastique coloré sur lequel on a ajouté deux éléments blancs.

- *Noter la hauteur d'affleurement du bloc coloré (état initial).*
- *Enlever les deux éléments supérieurs du bloc.*
- *Mesurer la durée du mouvement du bloc.*
- *Noter la nouvelle hauteur d'affleurement du bloc (état final).*

L'isostasie est un modèle qui a été élaboré par des géophysiciens du XIXe siècle sur la base d'études de fines variations de la gravité terrestre. Ce modèle propose qu'un équilibre – dit isostatique – est réalisé entre la couche superficielle et rigide qu'est la lithosphère et la couche profonde plus déformable et plus dense qu'est l'asthénosphère : la lithosphère « flotte » sur l'asthénosphère. Cet équilibre isostatique est provisoirement rompu lorsqu'une surcharge se met en place (calotte glaciaire par exemple) ou disparaît (fonte d'une calotte glaciaire).

6 Un modèle théorique explicatif : l'isostasie.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 3.** Exploitez les données pour mettre en évidence des mouvements verticaux passés et actuels de la lithosphère en Écosse et en Scandinavie.
2. **DOC. 4.** Décrivez l'évolution de la calotte glaciaire depuis 20 000 ans et formulez une hypothèse permettant d'expliquer les mouvements verticaux de la Scandinavie.
3. **DOC. 5 ET 6.** Déterminez ce que représentent les différents éléments du modèle dans la réalité et présentez quelques limites du modèle analogique. Éprouvez votre hypothèse.
4. **EN CONCLUSION.** Résumez comment sont mis en évidence des mouvements verticaux de la lithosphère et comment ils peuvent être expliqués.

UNITÉ 2

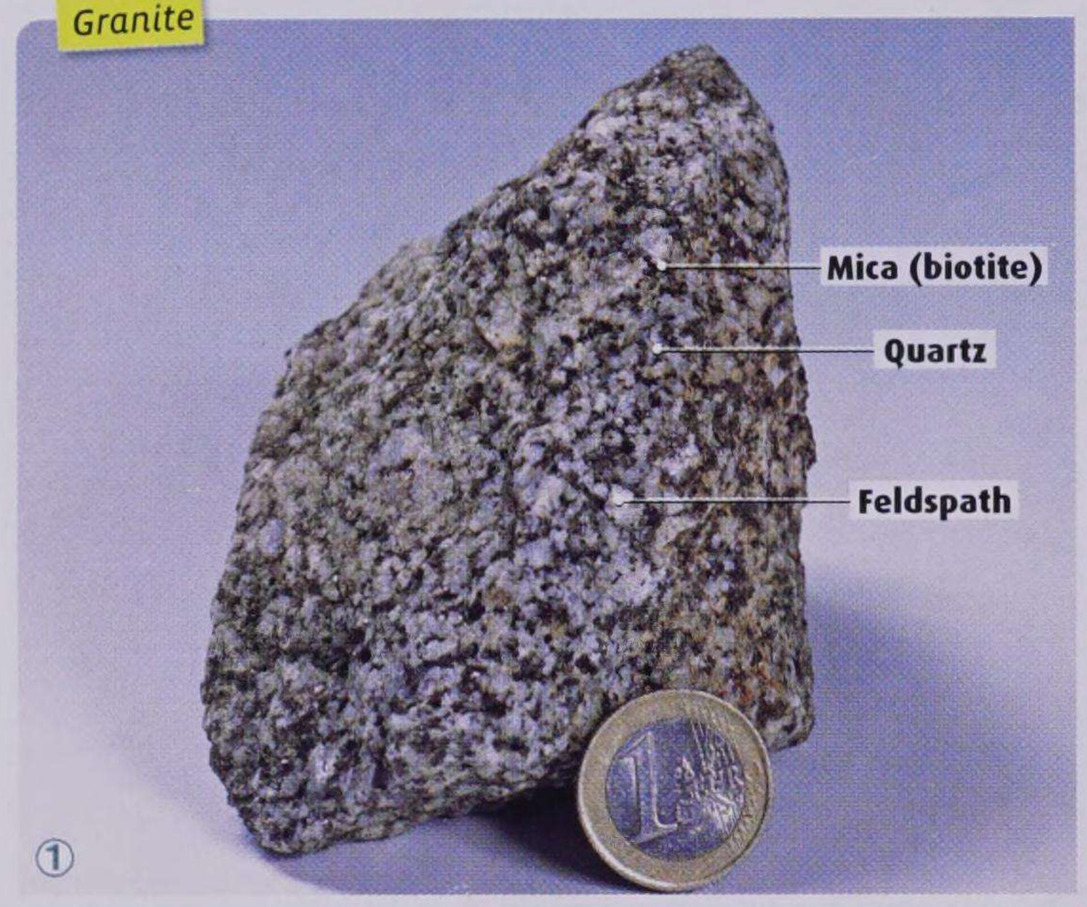
La dualité d'altitude entre océans et continents

La lithosphère repose en équilibre sur l'asthénosphère en raison de sa densité plus faible. Les continents ont une altitude moyenne de 870 m alors que la profondeur moyenne des océans est de 3730 m.

Comment expliquer la différence d'altitude entre continents et océans ?

Observer et collecter les roches en domaine continental

SORTIE DE TERRAIN



1 Les roches de la bordure orientale du Massif central (région de Valence). Au premier plan, la montagne de Crussol, au second plan, les monts du Vivarais. Ces reliefs sont constitués de roches diverses, dont des échantillons sont présentés.

La partie supérieure de la croûte continentale, échantillonnée sur des affleurements et à l'occasion de forages, comprend :

– des roches sédimentaires (11,0 % du volume) comme les calcaires, les grès et les argiles. Ce type de roches est formé essentiellement à partir de sédiments enfouis et durcis.

– des roches magmatiques (44,5 %) comme les granites. Ce type de roches résulte du refroidissement d'un magma.

– des roches métamorphiques (44,5 %) comme les gneiss, dont la composition chimique est proche de celle d'un granite. Ce type de roches provient de la transformation à l'état solide d'autres roches sous l'effet de variations de la pression et de la température.

Les roches sédimentaires forment une couverture superficielle reposant sur un socle magmatique et métamorphique. Cette couverture, épaisse de plusieurs kilomètres dans les grands bassins sédimentaires, a parfois entièrement disparu du fait de l'érosion.

La croûte continentale inférieure, échantillonnée grâce à des remontées volcaniques ou tectoniques, est constituée essentiellement de roches métamorphiques.

2 Les roches de la croûte continentale.

Évaluer la densité et l'épaisseur de la croûte continentale

	Granite	Gneiss	Calcaire
Masse de l'échantillon (g)	289,3	279,6	247,1
Volume d'eau final dans l'éprouvette (mL)	617	608	608

JE MANIPULE

Vous disposez de trois échantillons : granite, gneiss et calcaire.

- *Pesez chaque échantillon.*
- *Estimez son volume par immersion dans un bécher gradué contenant 500 mL d'eau.*
- *Déduisez-en la densité de chaque échantillon.*
- *Estimez alors la densité de la croûte supérieure en utilisant les proportions en volume des différentes roches fournies doc. 2.*

3 Une estimation de la densité des roches de la croûte continentale supérieure. La densité est la masse volumique d'un matériau rapportée à la masse volumique de l'eau (1 $g.cm^{-3}$). La densité de la croûte océanique est de 2,9.

On considère deux colonnes de roches de même section S, l'une de lithosphère continentale, l'autre de lithosphère océanique. Ces colonnes sont en équilibre isostatique sur l'asthénosphère. Lorsque cet équilibre est réalisé, il n'y a plus de mouvements verticaux relatifs entre elles. Les deux colonnes exercent donc la même pression sur le manteau sous jacent (qu'il s'agisse du manteau asthénosphérique ou du manteau lithosphérique). La pression exercée par une colonne de roche de masse m sur une surface S est égale à : $P = mg/S$.

Les deux colonnes considérées ayant la même section, cela implique que leur masse est égale. On peut donc écrire :

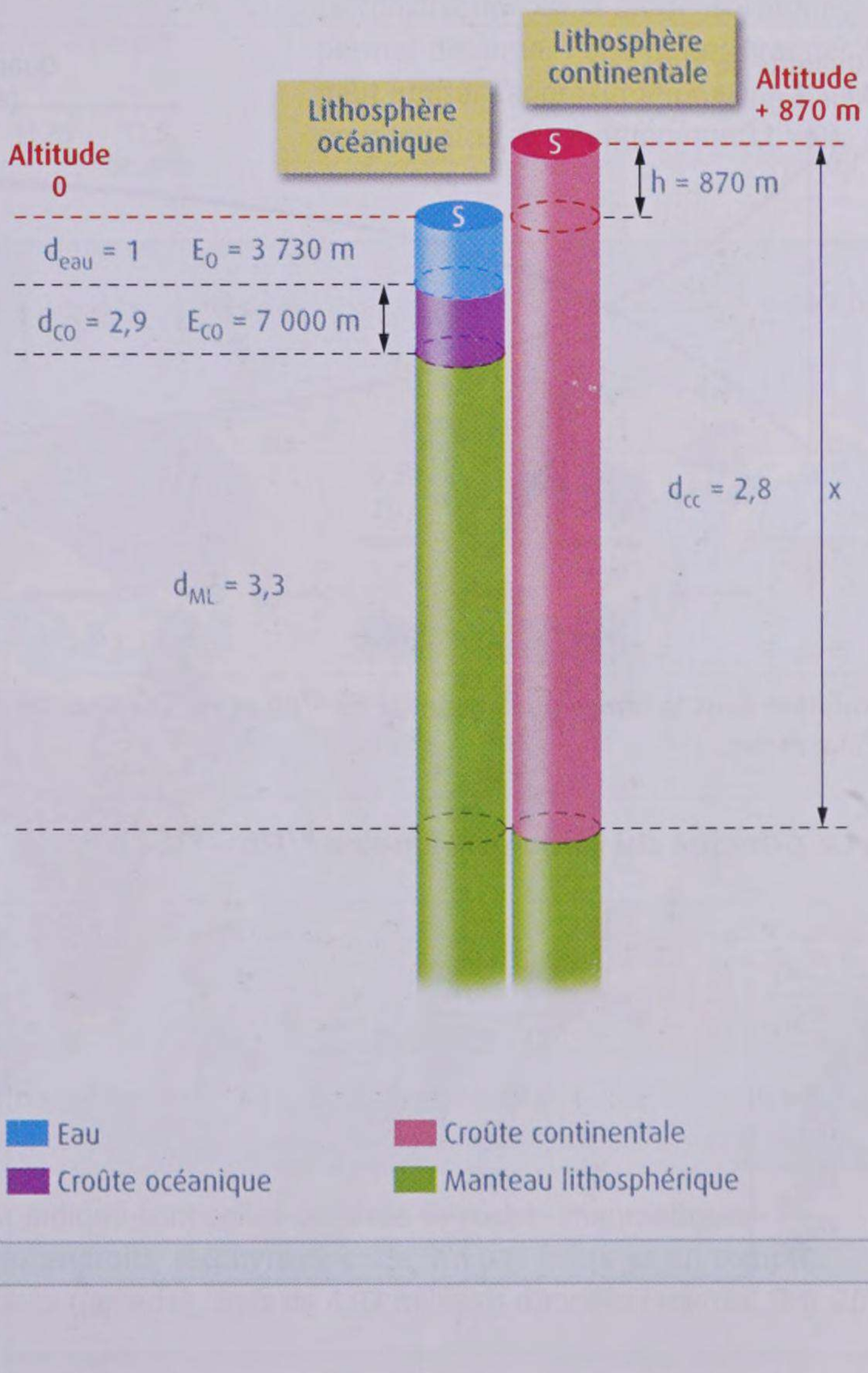
$$m_{\text{colonne continentale}} = m_{\text{colonne océanique}}$$

Soit :

$$d_{CC}\, x = (d_{eau}\, E_O) + (d_{CO}\, E_{CO}) + (d_{ML}\, [x - h - E_O - E_{CO}])$$

avec :

g : accélération de la pesanteur ;
d : densité du matériau considéré (CO : croûte océanique ; CC : croûte continentale ; ML : manteau lithosphérique) ;
E_{CO} : épaisseur moyenne de la croûte océanique (7 000 m) ;
E_O : profondeur moyenne des océans (3 730 m) ;
h : altitude moyenne de la croûte continentale (870 m) ;
x : épaisseur moyenne de la croûte continentale.



4 Un calcul de l'épaisseur de la croûte continentale.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

Exploitez les documents et les résultats de vos mesures afin d'expliquer, dans le cadre de l'isostasie, les différences d'altitude moyenne entre océans et continents.

Pour cela, vous pouvez :
- estimer la densité moyenne de la croûte supérieure à partir des échantillons récoltés **(DOC. 1 À 3)**.
- calculer l'épaisseur moyenne de la croûte continentale **(DOC. 4)**.
- comparer ces données avec les valeurs correspondantes pour la croûte océanique.
- rédiger une synthèse mettant en relation l'ensemble des informations.

UNITÉ 3

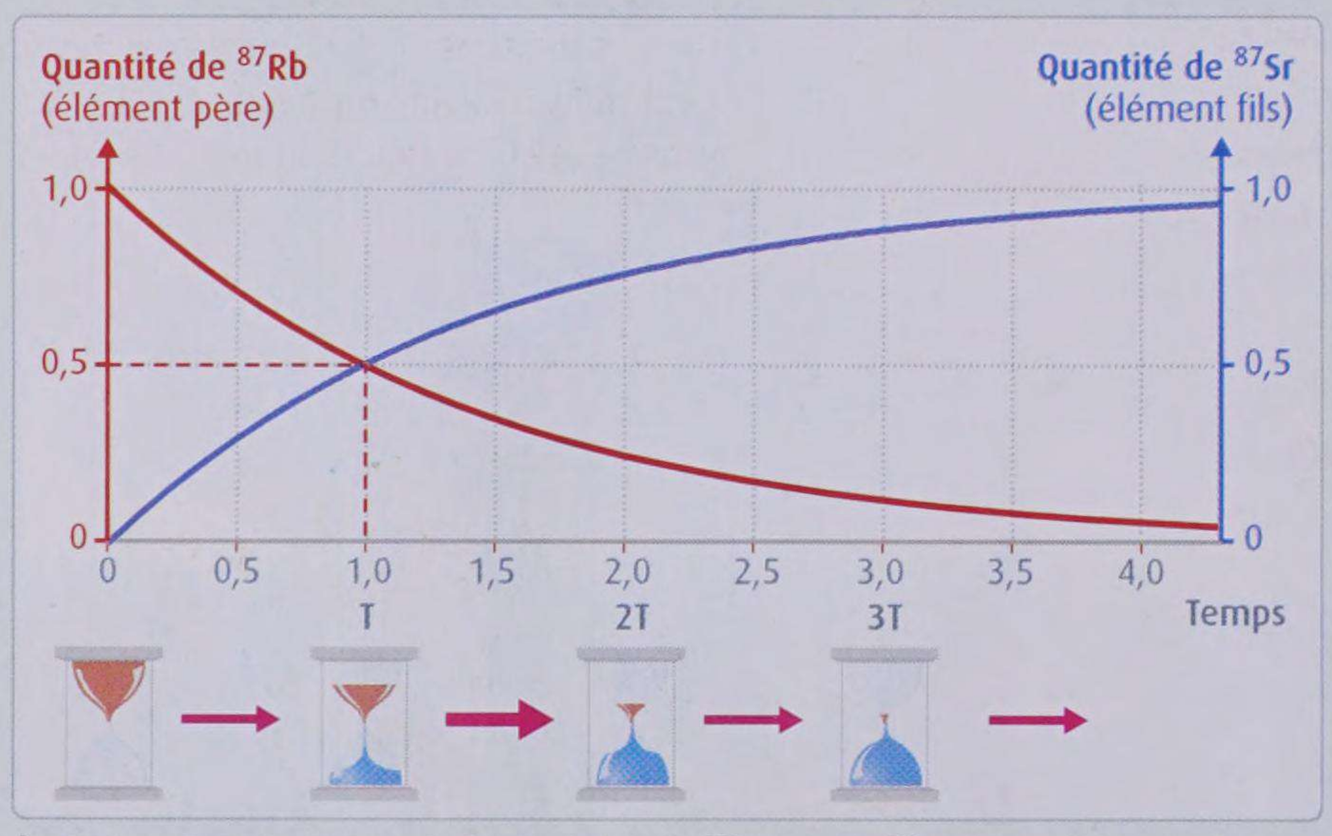
L'âge de la croûte continentale

La croûte continentale se distingue de la croûte océanique par son hétérogénéité, son épaisseur plus importante et sa densité plus faible. L'âge de la croûte océanique n'excède pas 200 Ma, alors que la Terre est âgée de 4,56 Ga.

Quel est l'âge de la croûte continentale ?

Comprendre une méthode de datation des roches magmatiques

Les minéraux des roches magmatiques contiennent en très faible quantité les éléments Rb (rubidium) et Sr (strontium). Ces derniers présentent différents isotopes que l'on peut distinguer et quantifier par spectrométrie de masse. L'isotope ^{87}Sr (élément fils) est produit par désintégration radioactive du ^{87}Rb (élément père). Le couple $^{87}Rb/^{87}Sr$ est caractérisé par sa période T (ou demi-vie), c'est-à-dire par le temps nécessaire pour que la moitié d'une quantité donnée d'éléments père se désintègre ($T = 48{,}9.10^9$ ans).



Évolution dans le temps de la quantité de ^{87}Rb et de ^{87}Sr dans un minéral d'une roche.

On démontre que les quantités d'éléments père et d'éléments fils au temps t sont liées par la relation suivante :

$$^{87}Sr_t = (e^{\lambda t} - 1)\ ^{87}Rb_t + {}^{87}Sr_0 \quad (1)$$

avec :

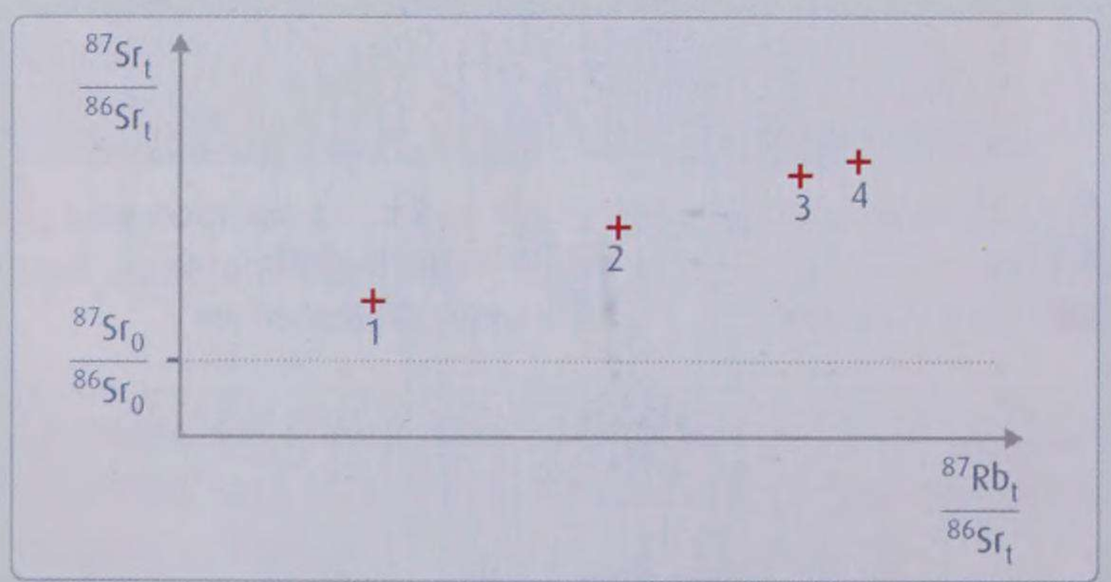
λ : constante de désintégration du couple $^{87}Rb/^{87}Sr$ ($\lambda = \text{Ln } 2 / T$)

$^{87}Sr_0$: quantité d'éléments fils présents à l'instant initial t_0 (correspondant à la cristallisation du magma)

$^{87}Sr_t$ et $^{87}Rb_t$: quantité de chaque isotope au temps t.

Le couple ^{87}Rb - ^{87}Sr constitue ainsi un géochronomètre qui permet de dater les roches magmatiques.

1 Le principe du géochronomètre ^{87}Rb - ^{87}Sr.



Valeur du rapport (^{87}Sr / ^{86}Sr) en fonction de celle du rapport (^{87}Sr / ^{86}Sr) dans quatre minéraux d'une même roche d'âge T. Les points obtenus s'alignent selon une droite : la droite isochrone.

Lors de la cristallisation d'un magma, les éléments Rb et Sr sont incorporés dans des minéraux. Rb se substitue au potassium et Sr se substitue au calcium. Les différents minéraux d'une même roche n'ayant pas la même composition chimique, ils incorporent Rb et Sr dans des proportions différentes. Le rapport initial $^{87}Rb_0$ / $^{86}Sr_0$ n'est donc pas le même pour tous les minéraux d'une roche magmatique. Cependant, la cristallisation utilise indifféremment les isotopes d'un même élément. Le rapport isotopique initial $^{87}Sr_0$ / $^{86}Sr_0$ est donc identique, dans tous les minéraux de la roche, à celui du magma d'origine. Comme ^{86}Sr est un isotope stable, sa quantité reste constante au cours du temps : $^{86}Sr_t = {}^{86}Sr_0$.

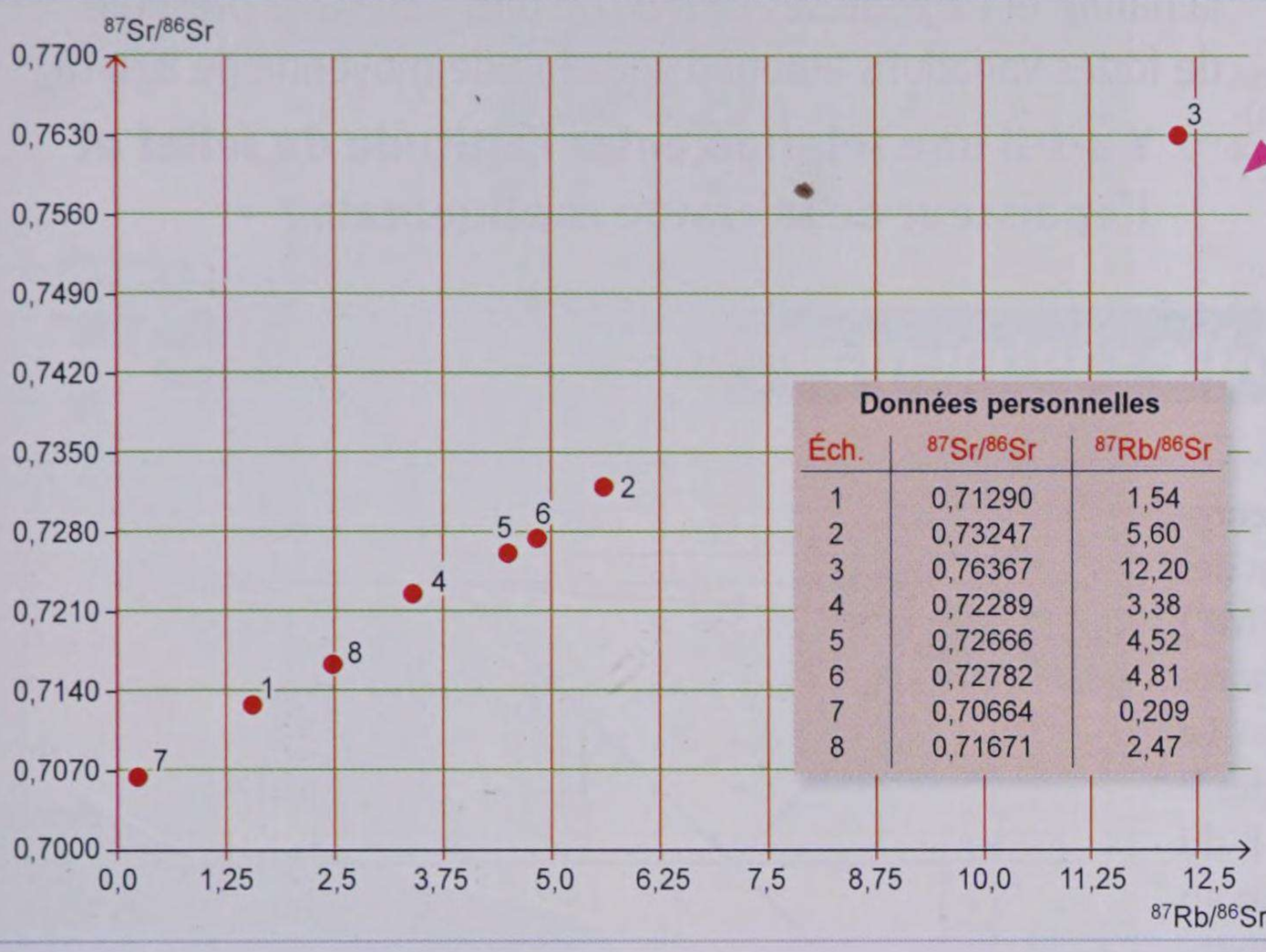
L'équation (1) peut donc s'écrire, en divisant chaque terme par $^{86}Sr_t$ ou $^{86}Sr_0$:

$$\left[\frac{^{87}Sr_t}{^{86}Sr_t}\right] = (e^{\lambda t} - 1)\left[\frac{^{87}Rb_t}{^{86}Sr_t}\right] + \left[\frac{^{87}Sr_0}{^{86}Sr_0}\right] \quad (2)$$

Les rapports isotopiques actuels, mesurés sur au moins deux minéraux d'une même roche permettent de déterminer $(e^{\lambda t} - 1)$, donc l'âge t de la roche.

2 L'utilisation pratique du géochronomètre ^{87}Rb - ^{87}Sr.

Dater des roches de la croûte continentale



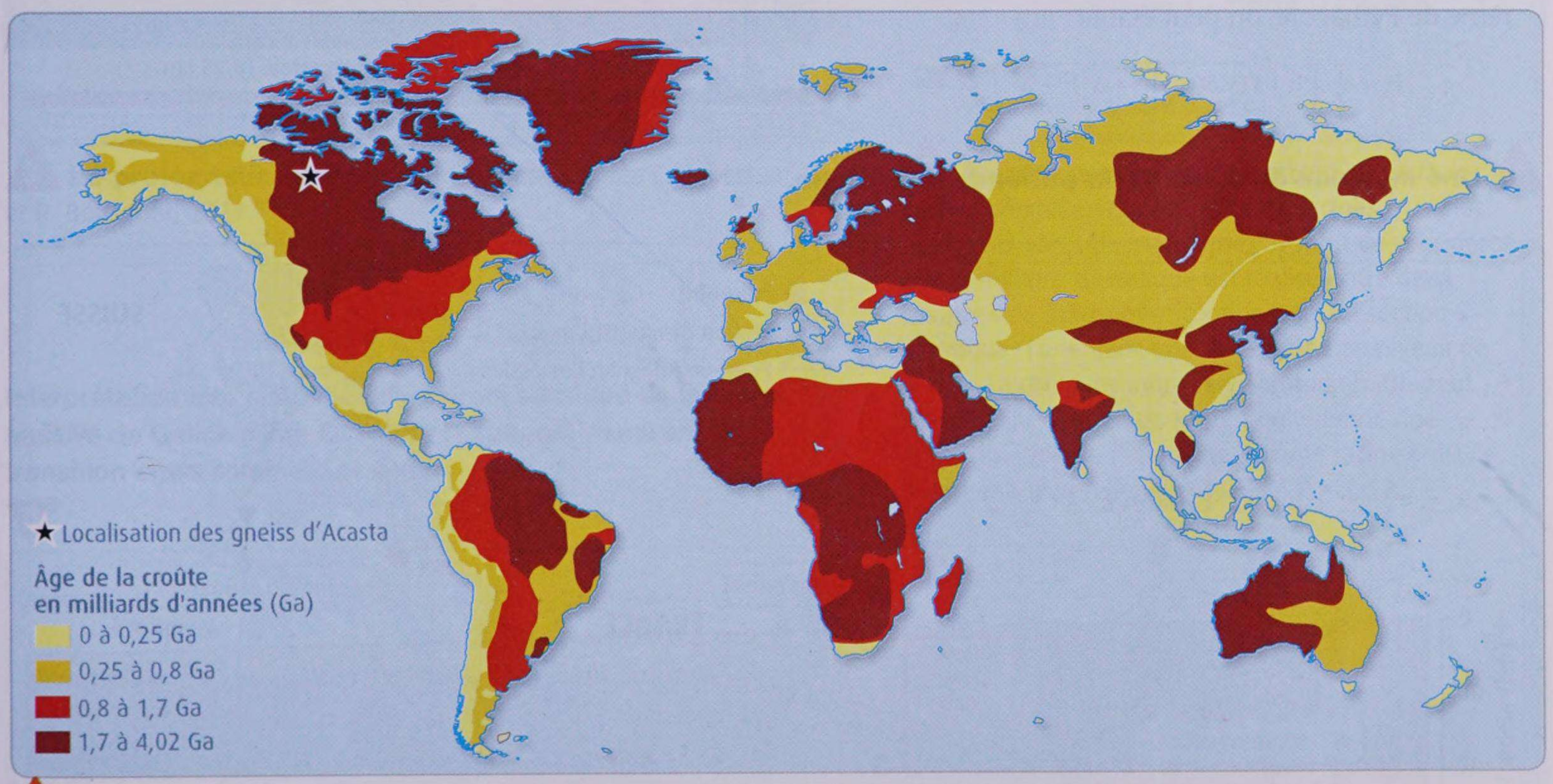
Données personnelles

Éch.	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{87}Rb/^{86}Sr$
1	0,71290	1,54
2	0,73247	5,60
3	0,76367	12,20
4	0,72289	3,38
5	0,72666	4,52
6	0,72782	4,81
7	0,70664	0,209
8	0,71671	2,47

J'UTILISE CHRONORAD

- *Dans l'onglet « Méthode au Rb/Sr » choisir « effectuer un calcul ».*
- *Suivre les différentes étapes proposées dans la fenêtre qui s'ouvre.*

3 La datation des granites de Plouaret (Bretagne). Pour dater ces roches, on a déterminé les rapports isotopiques (^{87}Sr / ^{86}Sr) et ($^{87}Rb/^{86}Sr$) dans plusieurs minéraux. Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau « Données personnelles » ci-contre.
La construction de la droite isochrone permet d'estimer l'âge de ces granites (on peut utiliser l'approximation $e^{\lambda t} - 1 \approx \lambda t$ pour le calcul, à condition que $\lambda t \approx 0$).



4 L'âge de la croûte continentale. Les roches dont l'âge est indiqué sont celles du socle de roches magmatiques et métamorphiques. La couverture sédimentaire qui, en de nombreux endroits, recouvre ce socle, n'a pas été prise en compte.
Les roches les plus anciennes connues sur Terre sont les gneiss d'Acasta (Canada), âgés de 4,02 milliards d'années (voir doc. 3 p. 207).

ACTIVITÉS

1. **DOC 1.** Décrivez l'évolution de ^{87}Sr et de ^{87}Rb au cours du temps. Dans l'équation (1), indiquez quels termes peuvent être mesurés par spectrométrie de masse et quels termes sont inconnus.
2. **DOC. 2.** Montrez que l'équation (2) est celle d'une droite, de la forme $y = ax + b$. Expliquez alors comment l'âge d'une roche peut être déterminé graphiquement.
3. **DOC. 3.** Déterminez l'âge de la roche étudiée. Comment peut-on expliquer que tous les points correspondant aux mesures ne soient pas situés exactement sur la droite isochrone ?
4. **DOC 4.** Déterminez dans quel intervalle se situent les âges de la croûte continentale.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez ce qui distingue la croûte continentale de la croûte océanique concernant son âge.

UNITÉ 4

Épaisseur de la croûte et reliefs continentaux

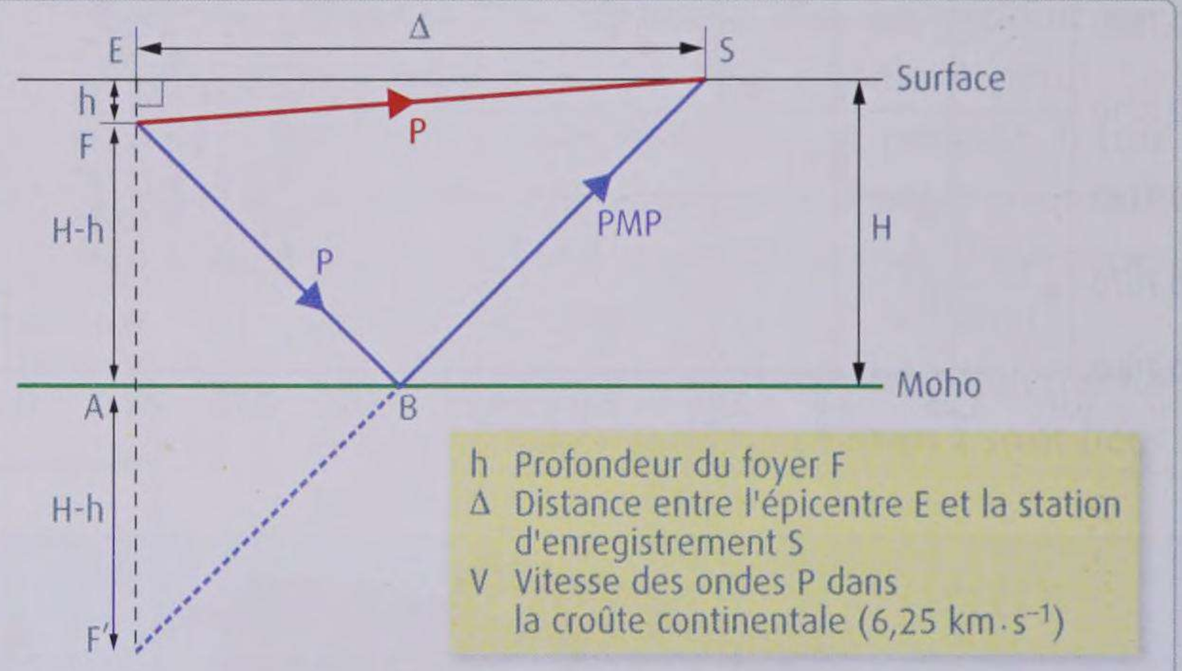
La croûte continentale est plus épaisse et moins dense que la croûte océanique. Elle est aussi plus hétérogène concernant la nature et l'âge de ses roches. De plus, son relief présente de fortes variations autour d'une altitude moyenne de 870 m.

Y a-t-il une relation entre l'altitude du relief et l'épaisseur de la croûte continentale ?

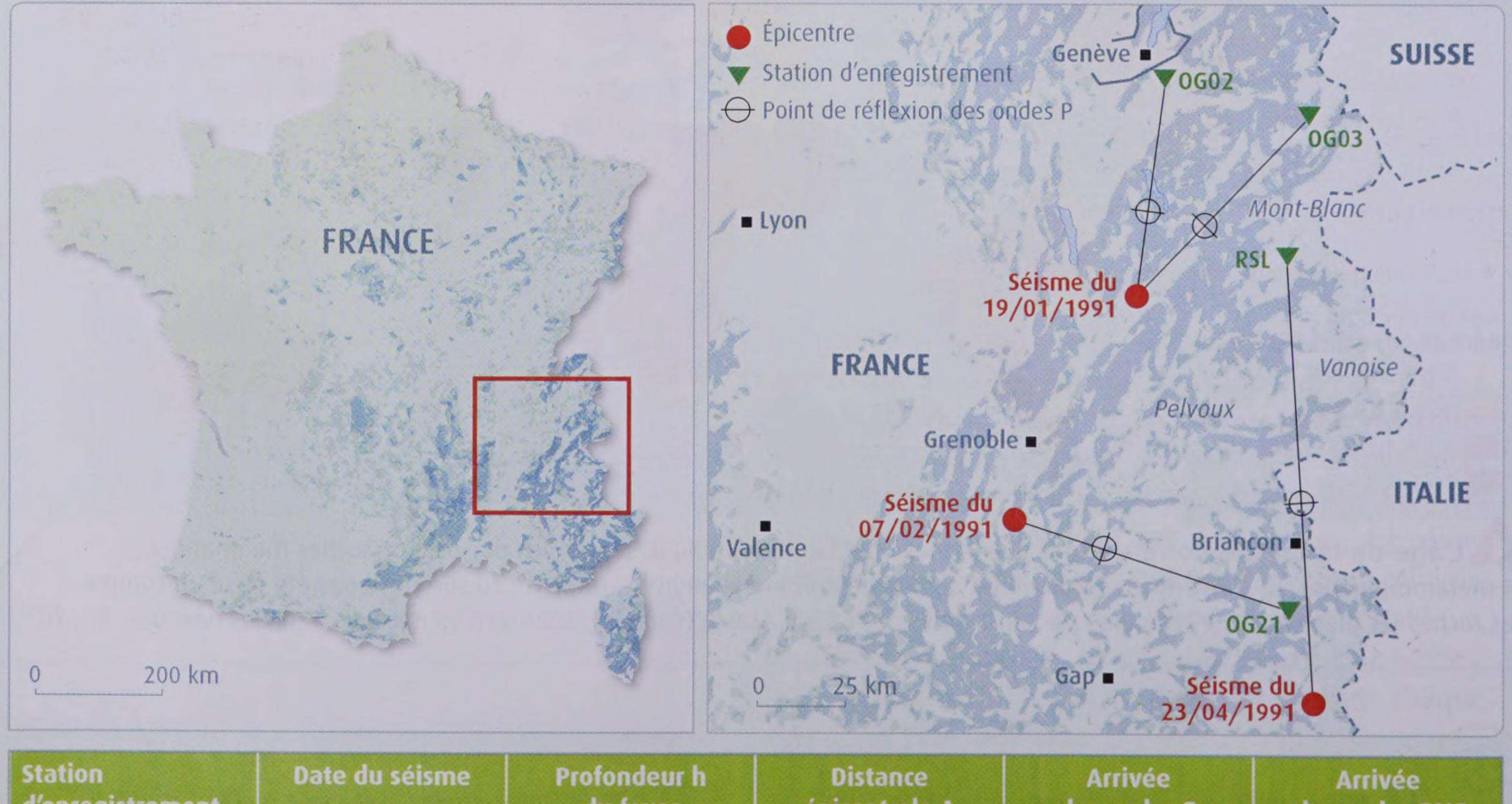
Estimer l'épaisseur de la croûte continentale

Lors d'un séisme, deux trains d'ondes P sont enregistrés par les sismographes : les premières sont des ondes directes (ondes P), les autres (ondes PMP) ont été réfléchies sur la discontinuité de Mohorovicic (Moho) qui sépare la croûte du manteau. Le retard δt des ondes PMP par rapport aux ondes P permet, connaissant la localisation du foyer F du séisme, de calculer la profondeur H du Moho au niveau du point de réflexion B. En utilisant le théorème de Pythagore, on peut établir :

$$H = \frac{1}{2}\left[h + \sqrt{(V.\delta t + \sqrt{h^2 + \Delta^2})^2 - \Delta^2} \right]$$



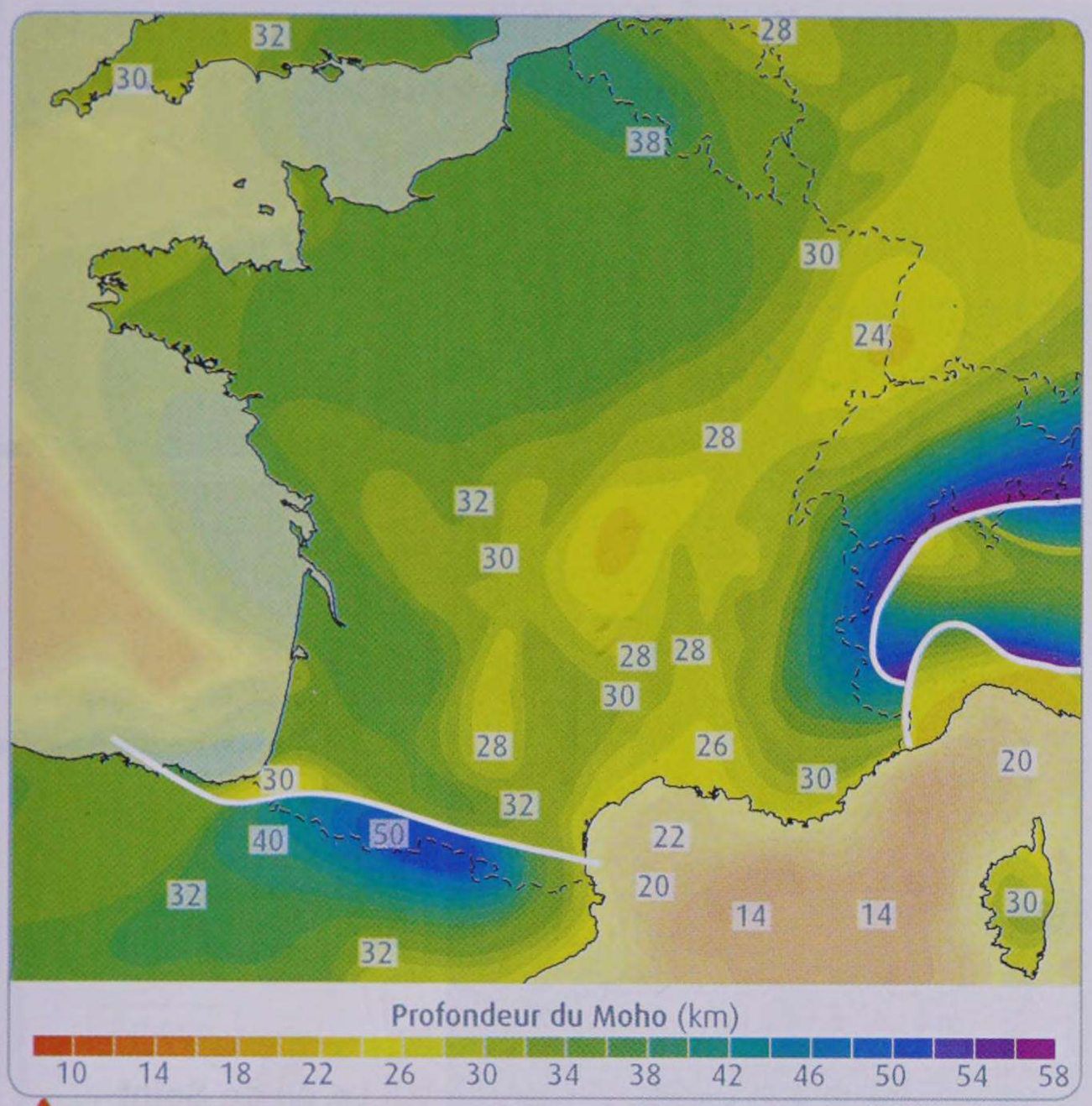
1 Une méthode de calcul de la profondeur du Moho.



Station d'enregistrement	Date du séisme	Profondeur h du foyer	Distance épicentrale Δ	Arrivée des ondes P	Arrivée des ondes PMP
OG02 (Annemasse)	19/01/1991	11 km	63,3 km	3 h 12 min 15,580 s	3 h 12 min 18,540 s
OG03 (Samoëns)	19/01/1991	11 km	70,8 km	3 h 12 min 16,493 s	3 h 12 min 19,583 s
OG21 (Guillestre)	07/02/1991	11 km	86,4 km	4 h 48 min 21,534 s	4 h 48 min 24,874 s
RSL (Roselend)	23/04/1991	10 km	135,8 km	5 h 53 min 02,005 s	5 h 53 min 05,325 s

2 Des données enregistrées pour différents séismes dans les Alpes.

Mettre en relation l'altitude des reliefs et l'épaisseur de la croûte

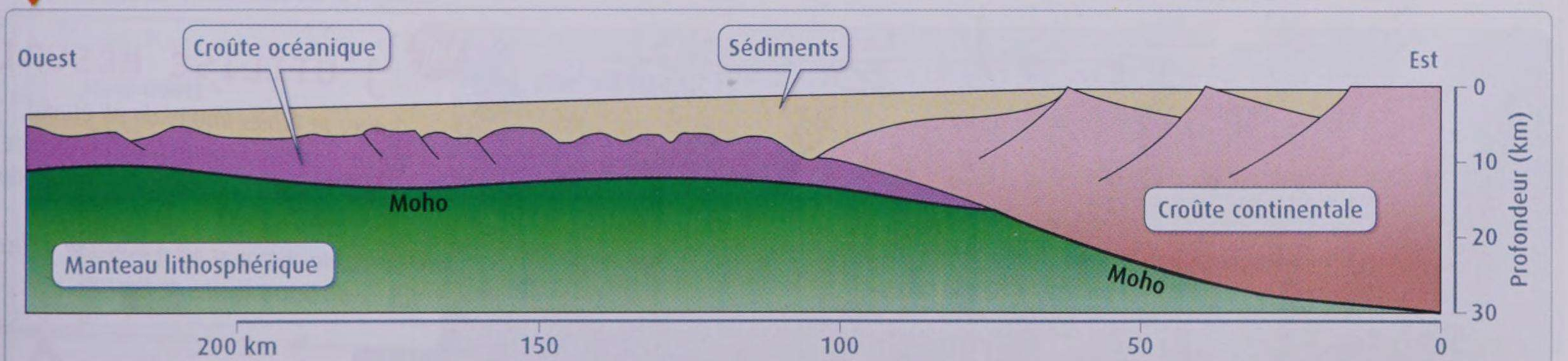


3 La profondeur du Moho en France. D'après C. Robert et R. Bousquet, 2012.

4 Isostasie et racine crustale. L'isostasie permet d'expliquer la présence de racines crustales sous les chaînes de montagnes. Il suffit de considérer que l'équilibre isostatique est réalisé entre deux colonnes de lithosphère continentale de section S identique : l'une dans une zone située au niveau de la mer, l'autre dans une zone d'altitude h. On peut ainsi établir une relation simple qui donne une approximation de l'épaisseur R d'une racine crustale à l'aplomb d'un relief d'altitude h : R = 5,6 h.

Interprétation très simplifiée d'un profil sismique de la marge passive de Galice (Côte Ouest de l'Espagne) montrant la transition entre continent et océan.

5



ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 2.** Utilisez un tableur pour déterminer la profondeur du Moho au niveau des points de réflexion pour chacun des séismes étudiés.
2. **DOC. 2 ET 3.** Décrivez la relation entre la profondeur du Moho et l'altitude en domaine continental.
3. **DOC. 4.** Démontrez la relation R = 5,6 h entre l'altitude h d'un relief et l'épaisseur R de la racine crustale, puis calculez la profondeur du Moho sous une montagne de 3 000 m d'altitude (aidez-vous du doc. 4 p. 147).
4. **DOC. 5.** Discutez de la relation altitude/épaisseur de la croûte continentale dans le cas d'une marge passive.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les relations entre l'altitude du relief et l'épaisseur de la croûte continentale.

UNITÉ 5

Des structures témoignant d'un épaississement crustal

Les données sismiques montrent qu'une importante racine crustale est associée au relief des chaînes de montagnes.

Comment expliquer l'épaississement de la croûte au niveau des chaînes de montagnes ?

Des indices structuraux à l'affleurement

SORTIE DE TERRAIN

Vocabulaire

Déformation : changement de la forme, des dimensions ou de la localisation d'un objet géologique.

1 Le pli de Saint-Clément (Hautes-Alpes). Les roches photographiées sont des roches sédimentaires : elles présentent des strates qui résultent du dépôt, initialement à l'horizontale, de sédiments par la suite consolidés.

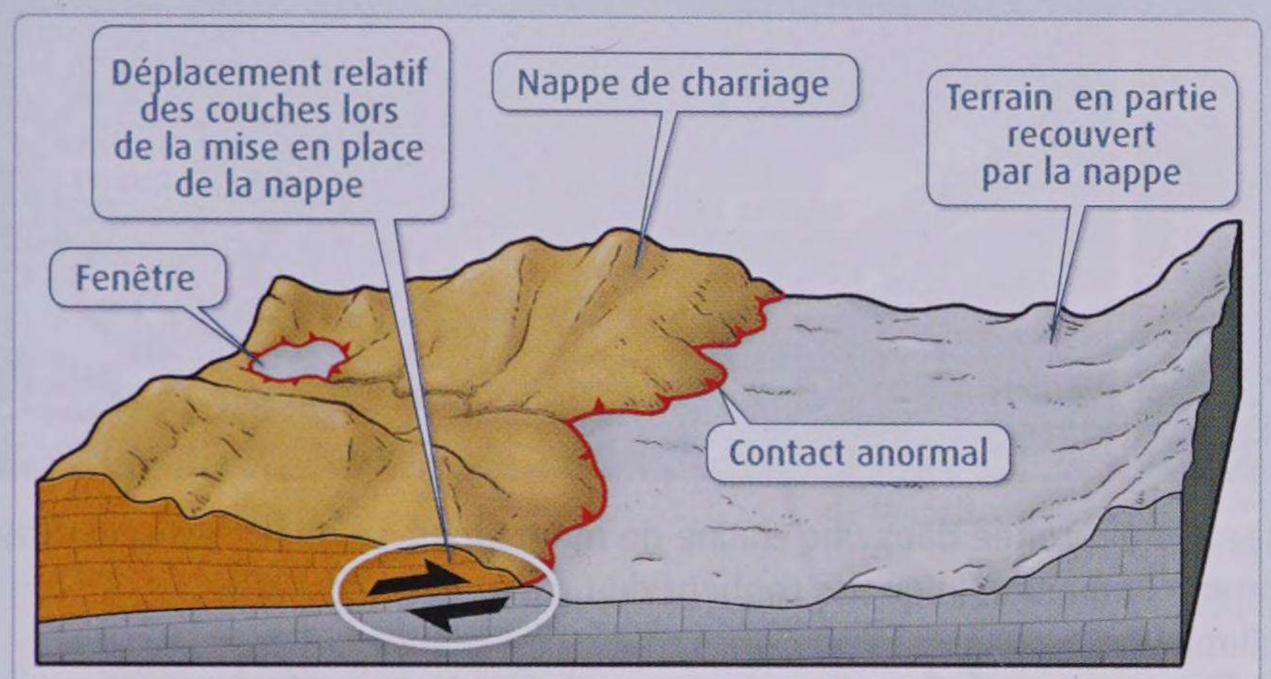
J'UTILISE MESURIM

- *Ouvrez le fichier image du pli étudié.*
- *Définissez une échelle (onglet « Image »/ « Créer - modifier l'échelle »/ « Attribution d'une échelle »).*
- *Tracez le segment AB à mesurer et lisez la valeur en bas à droite de l'écran.*

2 Pli-faille de Saint Rambert en Bugey (Ain) dans des roches sédimentaires. Avant la déformation, les deux points A et B étaient très proches l'un de l'autre, et alignés horizontalement. La faille est dite inverse.

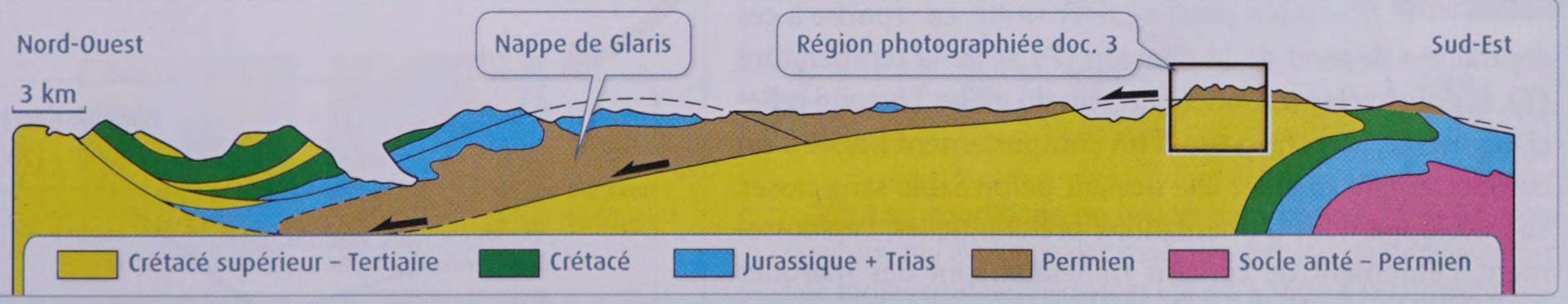
Des indices structuraux dans le paysage

3 La nappe de Glaris dans les Alpes helvétiques.



Structure d'une nappe de charriage.

Structure de la région de Glaris. Cette coupe publiée en 1934 correspond à l'interprétation actuelle de la région.



4 La découverte des nappes de charriage dans les Alpes.

À la fin du XIXe siècle, plusieurs thèses s'affrontent pour expliquer la disposition relative anormale des couches sédimentaires de la formation des Glaris. En 1884, le géologue Marcel Bertrand explique l'anomalie par un « recouvrement tectonique » : le contact serait dû au déplacement vers le Nord-Ouest de la couverture du massif de l'Aar (datant du Permien) à la suite d'une compression liée à la formation des Alpes. C'est l'une des premières formulations du concept de nappe de charriage : une telle nappe est un ensemble de terrains qui a été déplacé et est venu recouvrir un autre ensemble dont il était très éloigné à l'origine. Une nappe de charriage se distingue d'un chevauchement par l'ampleur du déplacement : de la dizaine à la centaine de kilomètres.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Décalquez les structures observées, légendez les schémas, justifiez le terme de déformations pour ces structures, puis caractérisez ces déformations.

2 **DOC. 2.** Utilisez les données fournies pour quantifier, à l'aide du logiciel Mesurim, la déformation.

3 **DOC. 3 ET 4.** Expliquez en quoi la disposition des roches du doc. 3 témoigne du phénomène de charriage et montrez comment les nappes de charriage contribuent à créer un épaississement de la croûte dans les chaînes de montagnes.

4 **EN CONCLUSION.** Montrez que les structures observées dans les chaînes de montagnes permettent d'expliquer l'épaississement de la croûte.

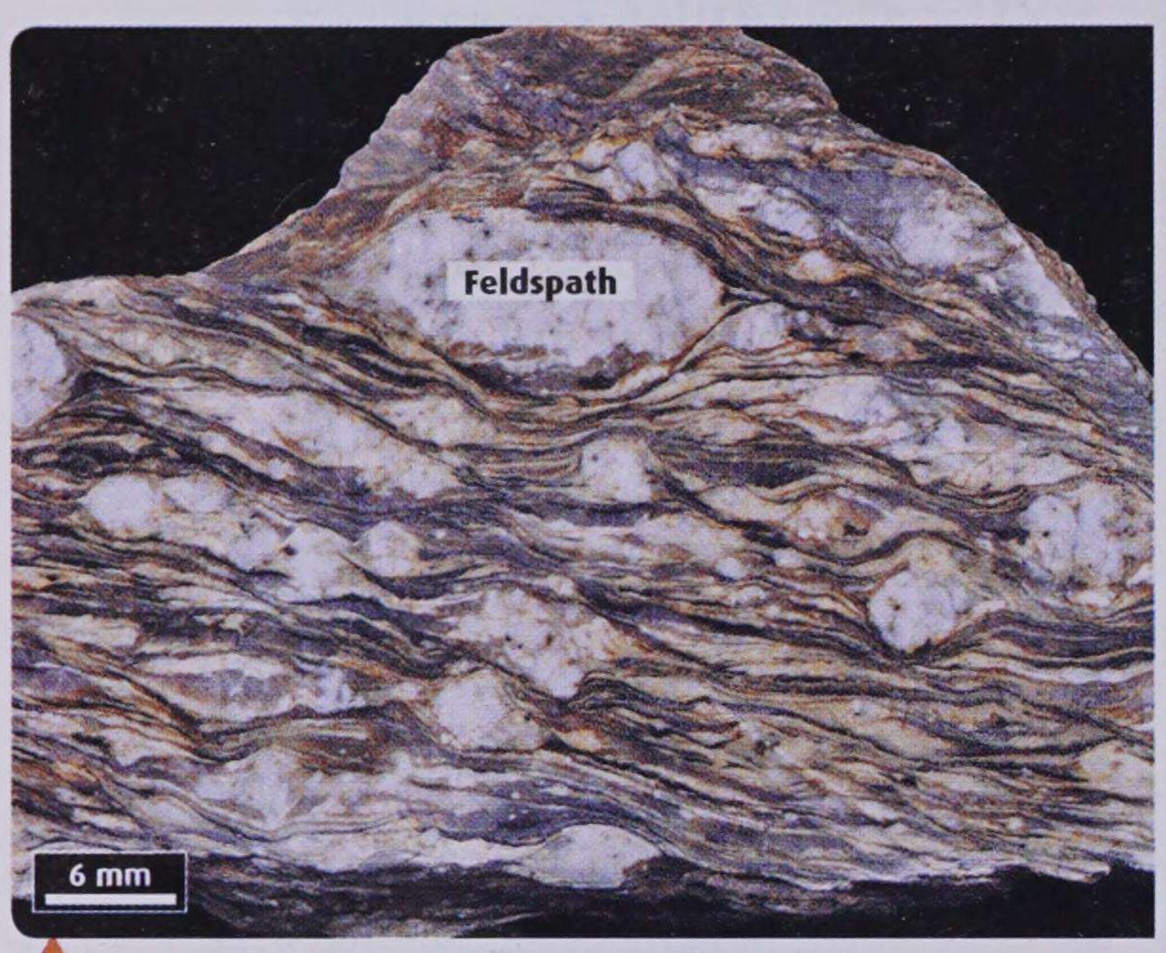
UNITÉ 6

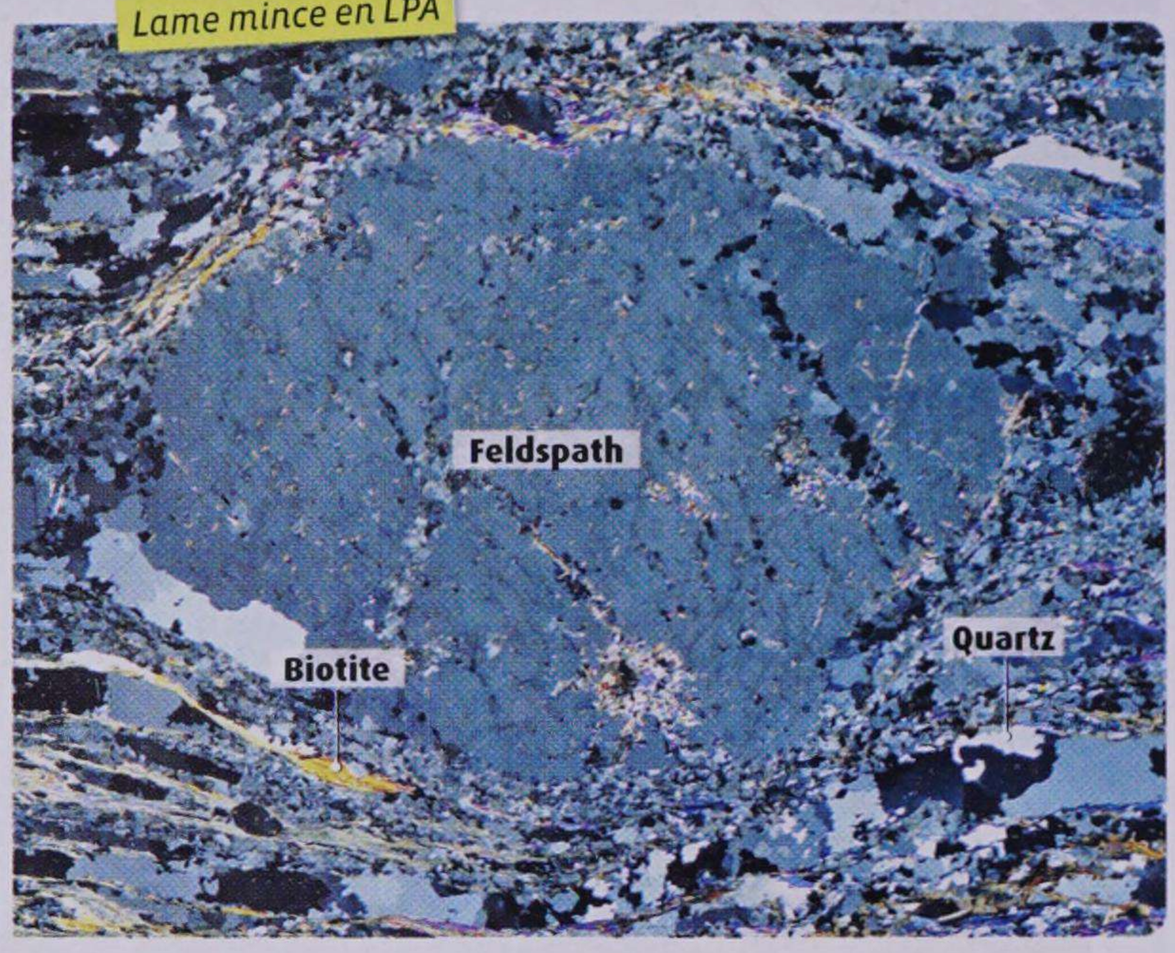
Des roches témoignant d'un épaississement crustal

Les structures observées dans les chaînes de montagnes témoignent d'un épaississement crustal. L'observation des roches fournit également des indices d'un épaississement de la croûte continentale.

En quoi les roches des chaînes de montagnes témoignent-elles d'un épaississement crustal ?

Des modifications structurales et minéralogiques



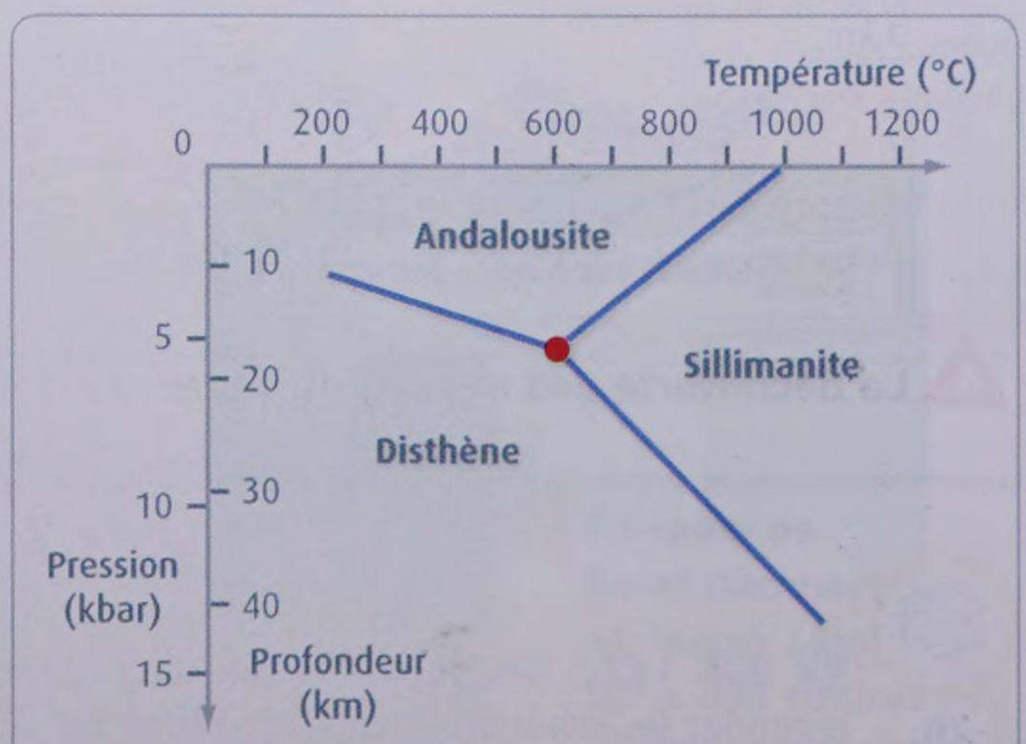


1 Échantillon et lame mince d'un gneiss. La roche a été récoltée dans une chaîne de montagnes. Le gneiss est une roche métamorphique issue de la transformation d'un granite. Comme le granite, le gneiss contient du quartz, des feldspaths et de la biotite (mica). Ce gneiss comprend en plus de la sillimanite.

Interview de **Patrick Cordier**, chercheur en physique des matériaux.

Une roche soumise à des contraintes inégales dans les différentes directions de l'espace peut se déformer. La réponse à ces contraintes dépend de la pression (P) et de la température (T), et donc de la profondeur au sein du globe. Lorsque celle-ci augmente, la roche passe d'un comportement fragile à un comportement ductile : elle devient déformable sans casser. Le développement d'orientations préférentielles, l'aplatissement, l'étirement de certains minéraux sont des marques de ces déformations. Les minéraux d'une roche témoignent aussi des conditions P/T qu'elle a rencontrées et donc de la profondeur où elle a été portée. En effet, certains minéraux existent sous différentes formes cristallines, chacune étant stable dans un domaine donné de pression et de température. Aussi, lorsque les conditions P/T auxquelles une roche est soumise changent, certains minéraux se transforment. Ces transformations ont lieu à l'état solide. Le métamorphisme est l'ensemble des transformations minéralogiques et structurales à l'état solide d'une roche soumise à des conditions P/T différentes de celles de sa mise en place.

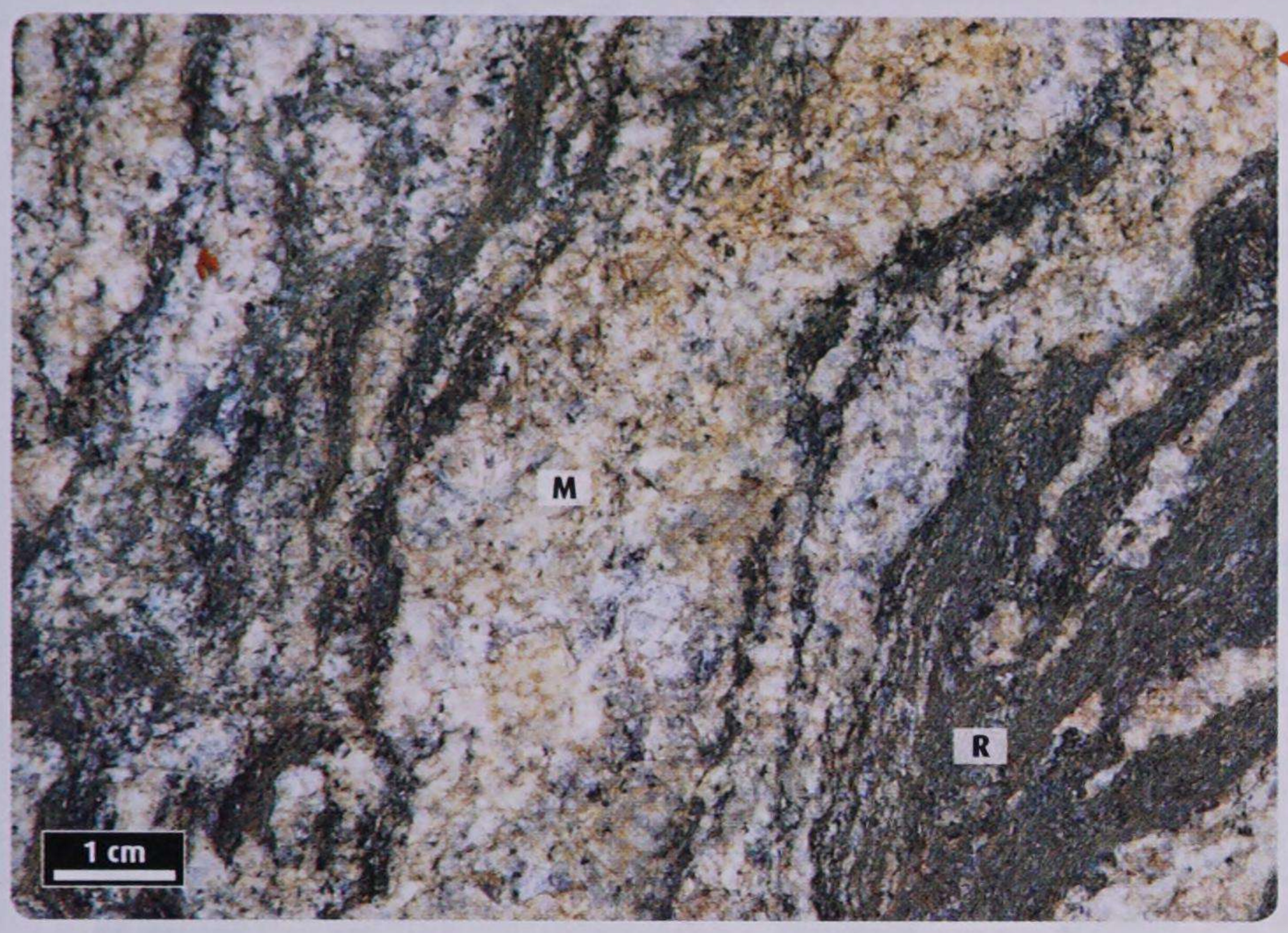
2 Qu'est-ce que le métamorphisme ?



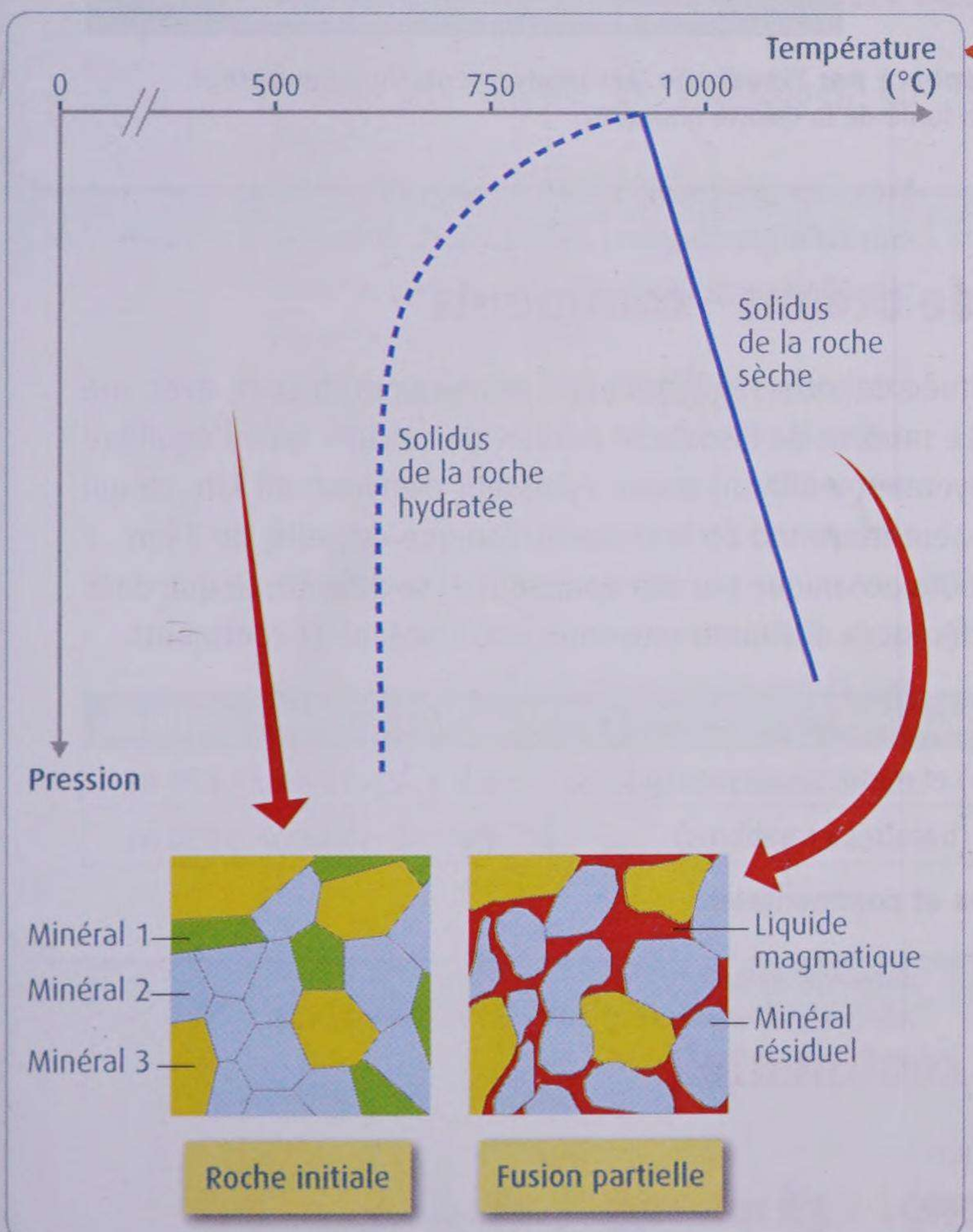
3 Le diagramme de stabilité d'une famille de silicates d'alumine. Ces minéraux, de même formule chimique, se présentent sous trois formes cristallines différentes : disthène, andalousite et sillimanite.

Des traces de fusion partielle

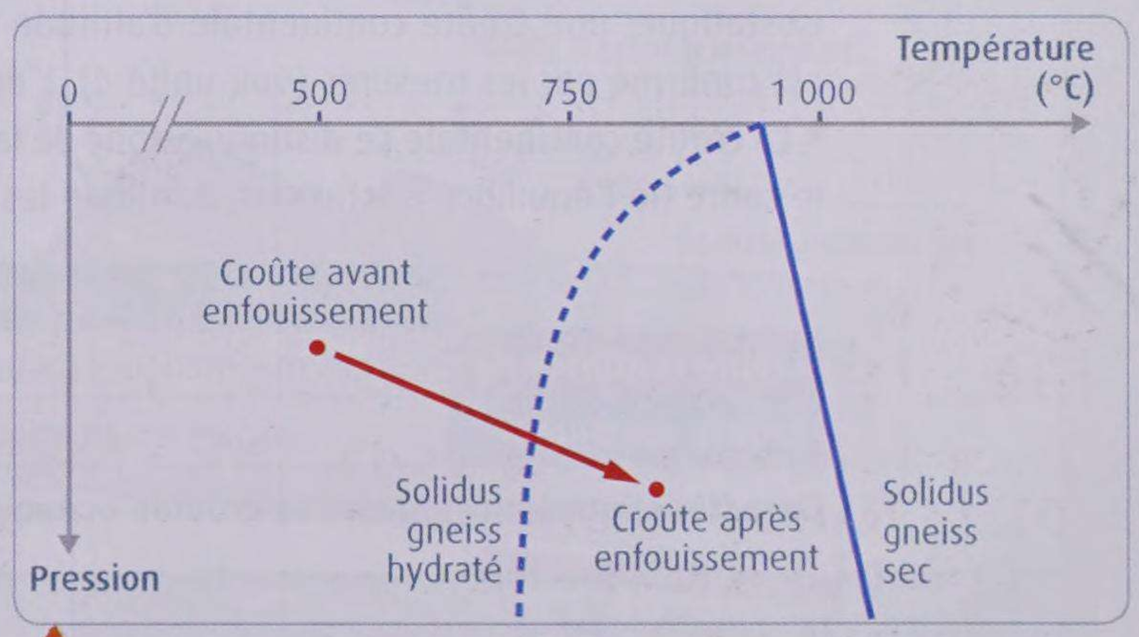
PISTE



4 Une migmatite de l'Altaï mongol. Ce vaste massif montagneux situé aux confins de la Chine et de la Mongolie culmine à 4500 m. Migmatite vient du grec « migma » qui signifie « mélange ». Sur l'échantillon, on repère des zones ayant l'aspect d'un granite (M) et d'autres montrant des traces de déformation (R), qui ont la composition d'un gneiss.



5 La fusion partielle des roches. Lorsque les conditions P/T auxquelles une roche est soumise changent, elle peut commencer à fondre. Sur le diagramme ci-contre, la courbe « solidus » sépare le domaine où la roche est solide de celui où coexistent liquide et solide. À une pression donnée, la présence d'eau abaisse la température du solidus. Lorsqu'une roche « franchit » son solidus, certains de ses minéraux fondent, formant un liquide magmatique, tandis que d'autres restent à l'état solide : on parle de fusion partielle.



6 Les conditions de fusion d'un gneiss. La flèche rouge représente l'évolution des conditions P/T lors de l'enfouissement de roches crustales hydratées qui est associé à la formation des nappes de charriage. Le liquide obtenu par fusion partielle peut former, après refroidissement, une roche comme le granite.

ACTIVITÉS

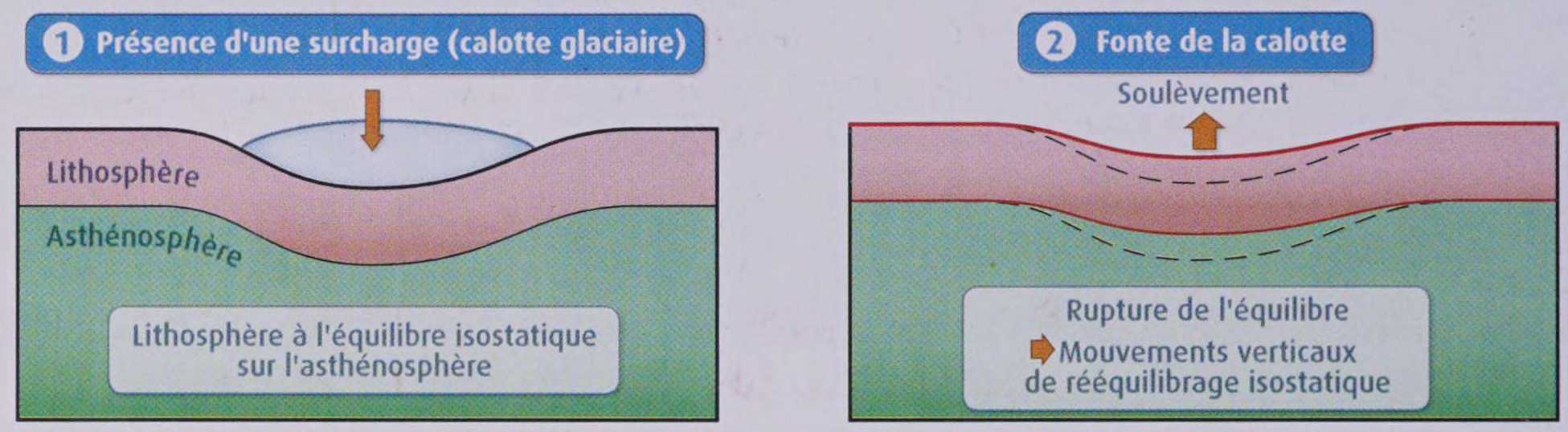
1. **DOC. 1 ET 2.** Indiquez quelles sont les caractéristiques du gneiss qui témoignent d'une déformation.
2. **DOC. 1 À 3.** Montrez que la présence de gneiss témoigne de modifications de pression et de température en lien avec l'épaississement de la croûte.
3. **DOC. 4 À 6.** Indiquez quelle caractéristique des migmatites suggère que ces roches résultent de la fusion partielle d'une roche de la croûte continentale.
4. **DOC. 6.** Expliquez en quoi la présence de roches montrant des traces de fusion partielle témoigne d'un épaississement crustal.
5. **EN CONCLUSION.** Expliquez en quoi les roches des chaînes de montagnes témoignent d'un épaississement de la croûte continentale.

CHAPITRE 1 Caractérisation du domaine continental

UNITÉ 1 La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère

• La lithosphère peut être affectée de mouvements verticaux consécutifs à la mise en place ou à la disparition d'une surcharge. Ainsi, en Scandinavie, on observe actuellement un soulèvement de la lithosphère, qui fait suite à la fonte d'une calotte glaciaire entre – 15 000 et – 7 000 ans.

• Ces mouvements attestent de la rupture provisoire d'un équilibre entre la lithosphère et l'asthénosphère : la lithosphère, rigide, repose en équilibre sur l'asthénosphère, plus déformable et plus dense. Le modèle qui décrit cet équilibre – dit isostatique – est l'isostasie.



L'explication des mouvements verticaux de la lithosphère par l'isostasie. Les mouvements de rééquilibrage isostatique sont très lents : ils se poursuivent bien après la fonte de la calotte glaciaire.

UNITÉ 2 La dualité d'altitude océans – continents

• La croûte continentale est essentiellement constituée de roches magmatiques et métamorphiques, avec une couverture superficielle de roches sédimentaires. Le modèle de l'isostasie permet de calculer qu'à l'équilibre isostatique, une croûte continentale d'altitude moyenne (+ 870 m) a une épaisseur d'environ 30 km, ce qui est confirmé par les mesures (voir unité 4). L'épaisseur moyenne de la croûte océanique est, elle, de 7 km.

• La croûte continentale se distingue donc de la croûte océanique par son épaisseur et sa densité, ce qui, dans le cadre de l'équilibre isostatique, explique les différences d'altitude moyenne entre océans et continents.

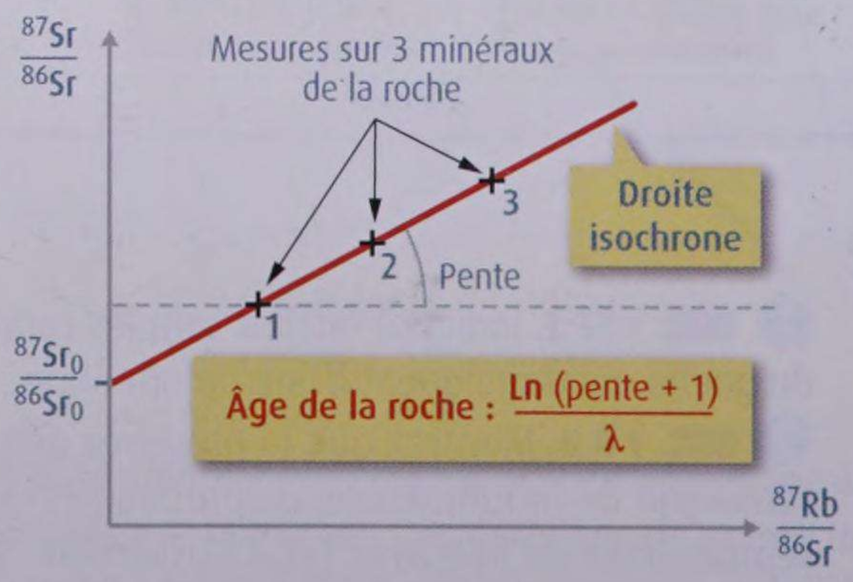
	Roches principales	Densité	Épaisseur /Altitude
Croûte continentale	Roches magmatiques (granites) et métamorphiques (gneiss)	2,8	30 km/+ 870 m
Croûte océanique	Roches magmatiques (basaltes et gabbros)	2,9	7 km/– 3 730 m

Caractéristiques moyennes des croûtes océaniques et continentales.

UNITÉ 3 L'âge de la croûte continentale

• La radiochronologie permet de dater la croûte continentale. Lors de la cristallisation d'un magma, les minéraux incorporent différents isotopes des éléments Rb et Sr en petite quantité. Dans la roche issue de la cristallisation, le ^{87}Rb, instable, se désintègre en ^{87}Sr au cours du temps, selon une loi exponentielle décroissante : les quantités de ^{87}Rb et de ^{87}Sr sont donc mathématiquement liées. La mesure par spectrométrie de masse de la quantité de ^{87}Rb et de ^{87}Sr dans différents minéraux d'une roche magmatique permet ainsi de déterminer son âge.

• La croûte continentale présente des roches d'âges variés, parfois supérieur à 4 Ga, alors que l'âge de la croûte océanique n'excède pas 200 Ma.

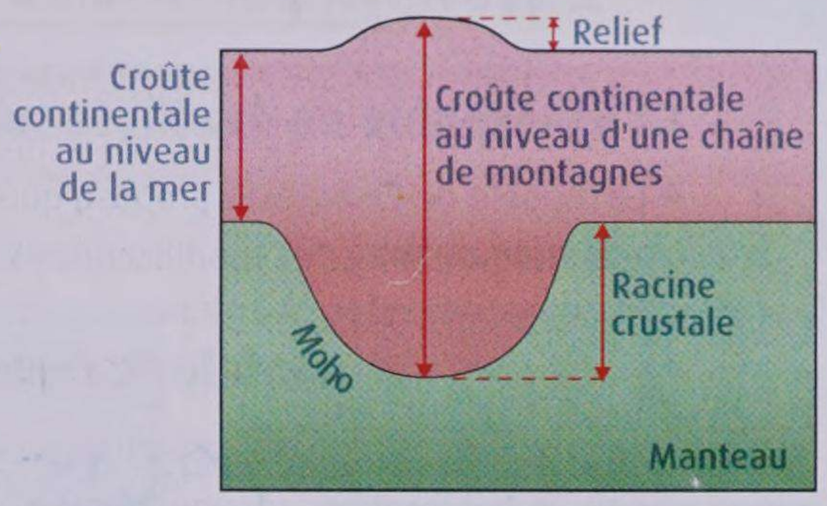


Détermination graphique de l'âge d'une roche magmatique.

UNITÉ 4 Épaisseur de la croûte et reliefs continentaux

• L'étude de la propagation des ondes sismiques permet de localiser la limite croûte/manteau (Moho) et de déterminer l'épaisseur de la croûte continentale.

• Épaisse de 30 km en moyenne, la croûte continentale est plus mince au niveau des marges passives, et s'amincit à mesure que l'on s'approche de la croûte océanique. L'épaisseur de la croûte continentale est accrue au niveau des reliefs montagneux (jusqu'à 70 km). Cet épaississement est surtout lié à la présence d'une racine crustale en profondeur. Moins dense que le manteau, celle-ci permet la réalisation d'un équilibre isostatique malgré la surcharge créée en surface par le relief.

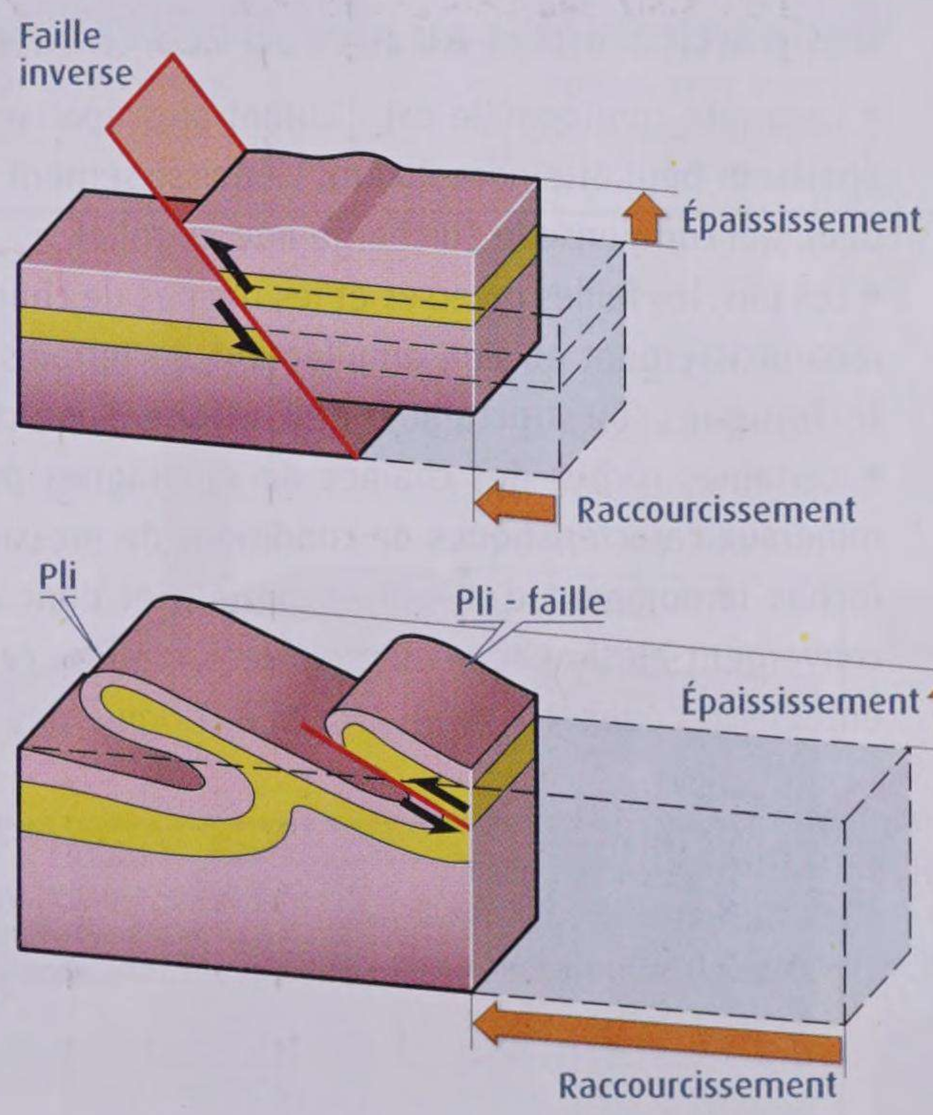


L'épaississement de la croûte au niveau d'une chaîne de montagnes.

UNITÉ 5 Des structures témoignant d'un épaississement crustal dans les chaînes de montagnes

• Dans les chaînes de montagnes, on observe :
– des plis et des failles inverses, qui sont des déformations s'accompagnant d'un raccourcissement et d'un épaississement par empilement de roches ;
– des nappes de charriage, qui résultent du déplacement de terrains. Ces derniers recouvrent d'autres terrains initialement éloignés et cet empilement de terrains entraîne un épaississement.

• Plis, failles inverses et nappes de charriage sont donc les indices tectoniques (ou structuraux) d'un racourcissement associé à un épaississement de la croûte dans les chaînes de montagnes.



Plis, failles inverses et épaississement de la croûte continentale.

UNITÉ 6 Des roches témoignant d'un épaississement crustal dans les chaînes de montagnes

• Dans les chaînes de montagnes, affleurent des roches métamorphiques, c'est-à-dire ayant subi des transformations à l'état solide. Certains de leurs minéraux sont étirés et/ou disposés dans une orientation privilégiée : la roche est déformée. D'autres minéraux résultent de transformations liées à une augmentation de la pression et de la température auxquelles ces roches ont été soumises, et donc à leur enfouissement.

• Certaines roches témoignent d'une fusion partielle de la croûte. Celle-ci s'explique par une augmentation de la pression et de la température auxquelles ces roches ont été soumises, qui est liée à leur enfouissement.

• La présence de ces différentes roches constitue des indices pétrographiques d'un empilement de terrains (associé à l'enfouissement) et donc d'un épaississement de la croûte dans les chaînes de montagnes.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 1

Caractérisation du domaine continental

L'essentiel par le texte

La lithosphère en équilibre sur l'asthénosphère

• Le modèle de l'**isostasie** propose que la lithosphère, rigide, « flotte » en équilibre sur l'asthénosphère, plus dense et plus déformable. Des modifications de cet équilibre sont à l'origine de mouvements verticaux de la lithosphère.

La croûte continentale se distingue de la croûte océanique

• La croûte continentale, essentiellement constituée de granite et gneiss, est moins dense que la croûte océanique. Son épaisseur moyenne est d'une trentaine de km, contre 7 km pour la croûte océanique. Ces différences expliquent, dans le cadre de l'isostasie, les différences d'altitude moyenne entre domaine continental et domaine océanique.

• Les roches magmatiques de la croûte continentale peuvent être datées par **radiochronologie** : elles contiennent des éléments chimiques instables comme ^{87}Rb, qui se désintègre en ^{87}Sr au cours du temps. Les quantités de ^{87}Rb et de ^{87}Sr sont liées et varient avec le temps : leur mesure permet de calculer l'âge de la roche. L'âge des roches de la croûte continentale est varié, jusqu'à plus de 4 Ga, alors que celui des roches de la croûte océanique n'excède pas 200 Ma.

Des particularités au niveau des chaînes de montagnes

• La croûte continentale est d'autant plus épaisse que le relief est élevé. Dans les chaînes de montagnes, son épaisseur peut atteindre 70 km. L'épaississement est surtout lié à la présence d'une **racine crustale** en profondeur, qui compense la surcharge liée au relief.

• Les plis, les failles inverses et les nappes de charriages observés dans les chaînes de montagnes résultent d'un raccourcissement et d'un empilement de terrains qui expliquent l'épaisseur de la croûte. Ce sont des **indices tectoniques** (ou structuraux) de l'histoire d'une chaîne de montagnes.

• Certaines roches des chaînes de montagnes présentent des traces de fusion partielle, ou contiennent des minéraux caractéristiques de conditions de pression et de température élevées (roches métamorphiques). Ces roches témoignent d'un enfouissement et donc d'un empilement de terrains. Les **indices pétrographiques** convergent ainsi avec les indices tectoniques : ce sont un raccourcissement et un empilement de terrains qui entraînent l'épaississement crustal à l'origine des reliefs positifs que sont les chaînes de montagnes.

Les capacités et attitudes

- Réaliser et exploiter une modélisation analogique pour comprendre la notion d'isostasie **(unité 1)**
- Recenser, extraire et organiser des données de terrain **(unités 2, 5 et 6)**
- Utiliser un logiciel pour déterminer un âge grâce à la méthode de la droite isochrone **(unité 3)**
- Utiliser un tableur pour traiter des données sismiques afin d'évaluer la profondeur du Moho **(unité 4)**
- Repérer, à différentes échelles, des indices tectoniques et pétrographiques d'un raccourcissement et d'un enfouissement **(unités 5 et 6)**

Mots clés

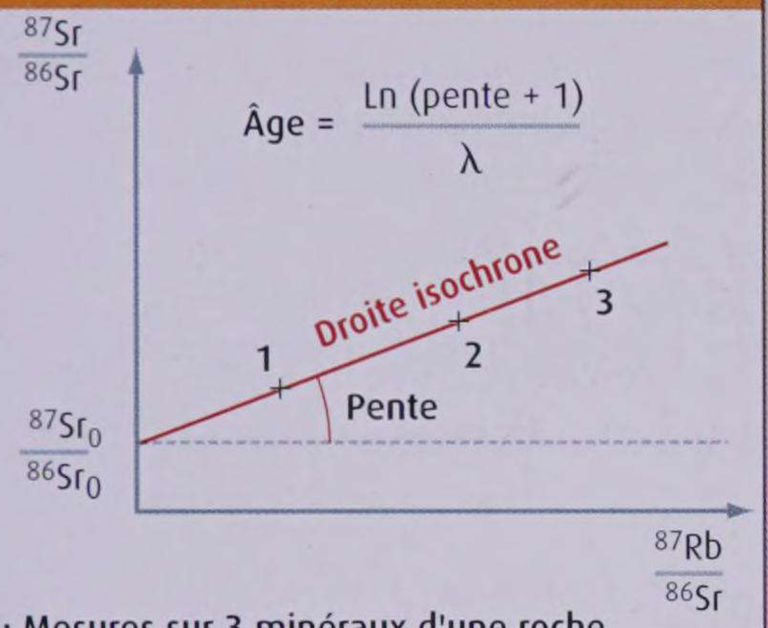
Voir aussi Dico des SVT p. 370

Indices pétrographiques : informations issues de l'étude de la structure et/ou de la minéralogie d'une roche qui renseignent sur l'histoire de cette roche et de l'ensemble auquel elle appartient.
Indices tectoniques (ou structuraux) : informations issues de l'étude de l'ensemble de déformations (plis, failles, nappes de charriage) ayant affecté des terrains postérieurement à leur formation qui renseignent quant aux processus à l'origine de ces déformations.
Isostasie : état d'équilibre de la lithosphère rigide sur la couche profonde plus déformable qu'est l'asthénosphère.
Racine crustale : épaississement de la croûte continentale à l'aplomb des chaînes de montagnes.
Radiochronologie : méthode de datation des roches fondée sur la décroissance radioactive naturelle de certains éléments chimiques contenus dans les minéraux.

L'essentiel par l'image

Caractérisation du domaine continental

Croûte continentale d'âge variable (jusqu'à 4 milliards d'années)



+ : Mesures sur 3 minéraux d'une roche

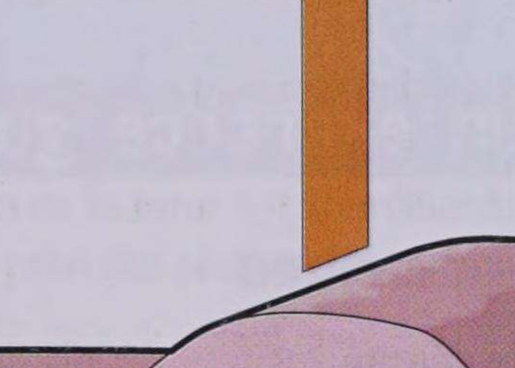
Croûte continentale moins dense et plus épaisse que la croûte océanique

Croûte océanique	Croûte continentale
Épaisseur moyenne = 7 km Densité = 2,9	Épaisseur moyenne = 30 km Densité = 2,8

Croûte continentale épaissie au niveau des chaînes de montagnes en raison d'un raccourcissement et d'un empilement de terrains

Indices tectoniques

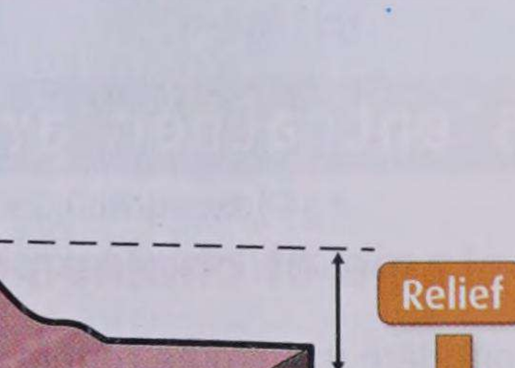
Failles inverses, plis



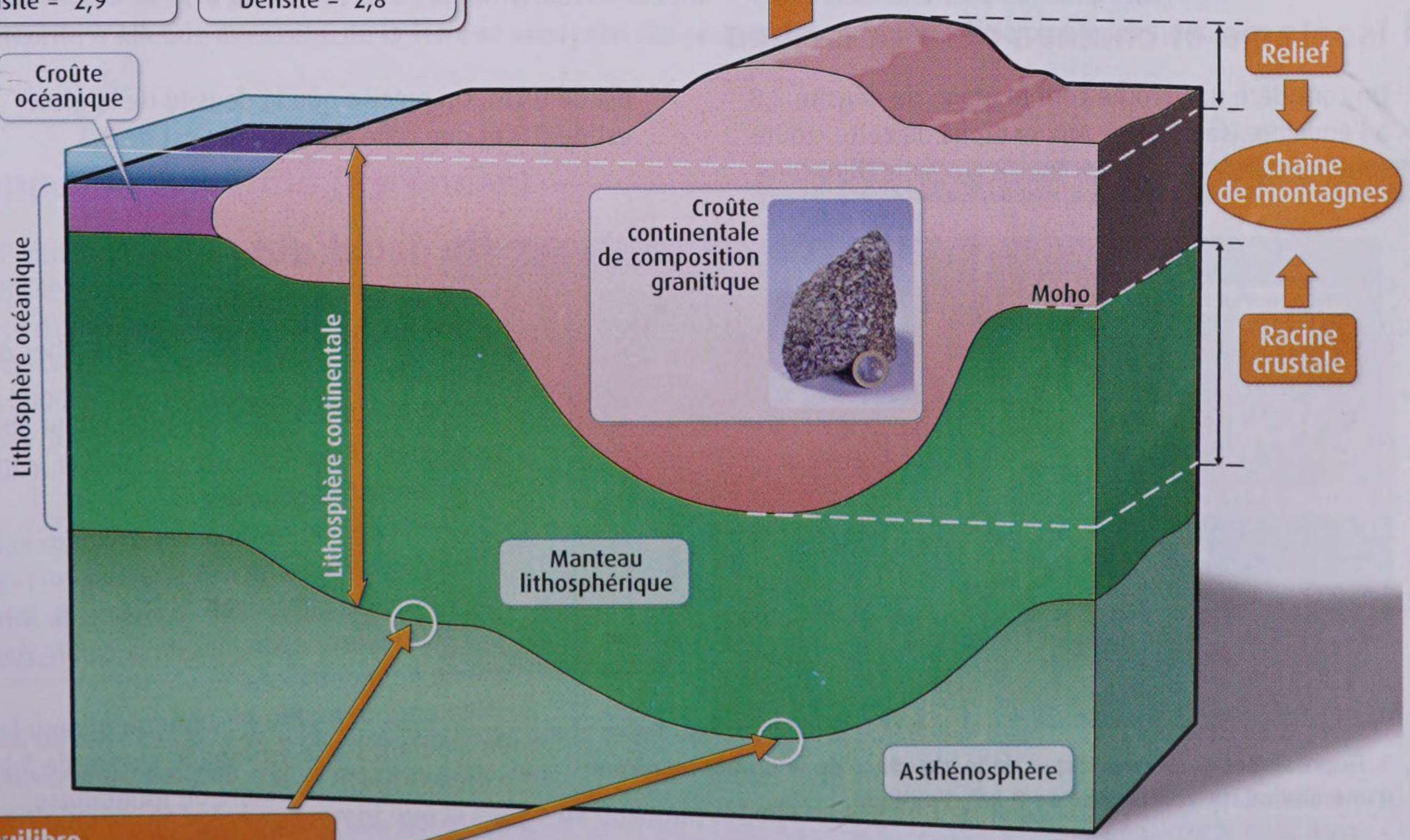
Nappes de charriage

Indices pétrographiques

Roches métamorphiques



Roches avec traces de fusion partielle



Équilibre de la lithosphère sur l'asthénosphère = Équilibre isostatique

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La croûte continentale :

a. est plus épaisse et plus dense que la croûte océanique.
b. a une composition globalement basaltique.
c. est d'autant plus épaisse que les reliefs sont importants.
d. est amincie dans les chaînes de montagnes et épaissie au niveau des marges passives.

2. L'équilibre isostatique :

a. est rompu dans une chaîne de montagnes en raison de la racine crustale.
b. est rompu lorsqu'une calotte glaciaire se forme sur un continent.
c. est rompu lors de la fonte d'une calotte glaciaire sur un continent.
d. est un état d'équilibre de la lithosphère rigide sur l'asthénosphère plus déformable.
e. est un état d'équilibre entre la croûte terrestre et le manteau lithosphérique.

3. Dans une chaîne de montagnes :

a. l'épaississement de la croûte continentale est surtout dû au relief.
b. la profondeur du Moho est proportionnelle à l'altitude du relief.
c. l'épaississement de la croûte est lié à un raccourcissement et à un enfouissement.
d. les nappes de charriage contribuent à amincir la croûte continentale.
e. des traces de fusion partielle dans une roche témoignent d'une baisse de pression subie par cette roche.

2 Définitions

Isostasie, nappe de charriage, croûte continentale, racine crustale, granite, radiochronologie, métamorphisme

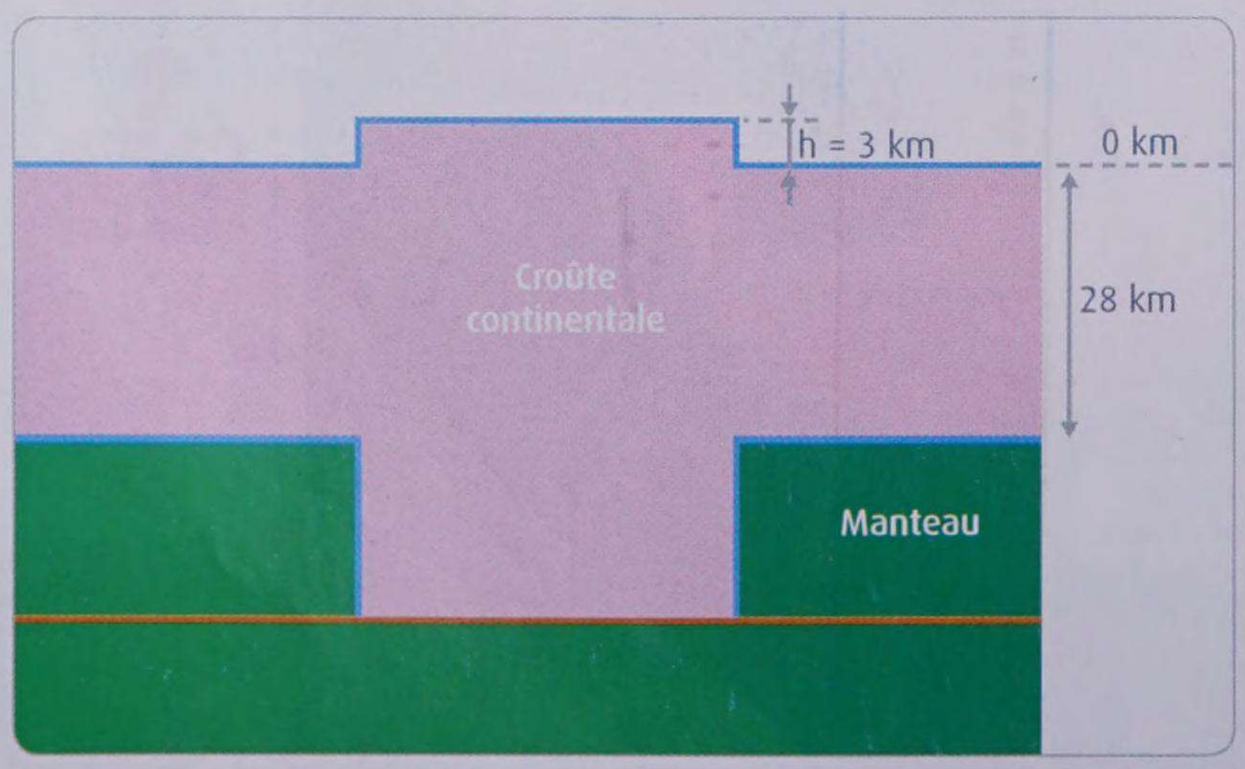
3 Qui suis-je ?

a. Je suis une droite dont la pente permet de calculer l'âge d'une roche magmatique.
b. Je suis rompu lorsqu'une calotte glaciaire se forme ou lorsqu'elle fond.
c. On me trouve en profondeur sous les chaînes de montagnes et je suis d'autant plus imposante que les reliefs en surface sont élevés.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 Isostasie et chaînes de montagnes

On considère une croûte continentale, de densité 2,8, à l'équilibre isostatique. Aux endroits où cette croûte continentale a pour épaisseur 28 km, son altitude est de 0 km. On précise que la densité de la glace est de 0,9 et que celle du manteau est de 3,3.



1. Représentation schématique de la structure de la croûte au niveau d'une chaîne de montagnes de 3 km d'altitude.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

- Identifiez les deux colonnes de roches que l'on va comparer.
- Repérez sur le schéma la profondeur au niveau de laquelle l'équilibre isostatique est réalisé.

• Raisonner et conclure

- Écrivez l'égalité des masses des deux colonnes au dessus de cette surface et déduisez-en l'épaisseur de la racine crustale dans la chaîne de montagnes.
- Calculez alors l'épaisseur de la croûte dans cette chaîne de montagnes.
- Reprenez le même raisonnement pour la question 2 en ajoutant sur le schéma le glacier de 1 km d'épaisseur sur la chaîne de montagnes.

QUESTIONS ❶ Calculez la profondeur du Moho sous une chaîne de montagnes d'altitude moyenne h = 3 km.
❷ Calculez la profondeur du Moho si cette même chaîne de montagnes est recouverte d'un glacier de 1 km d'épaisseur.

5 La datation d'une météorite

Utiliser des modes de représentation graphique

La météorite « Allende », tombée au nord du Mexique en 1969, contient des inclusions de petites sphères nommées chondres (doc. 1) qui ont une composition voisine de la composition moyenne de la Terre. Ce type de météorite, dit chondritique, s'est formé en même temps que le système solaire. Des mesures des rapports $^{87}Rb/^{86}Sr$ et $^{87}Sr/^{86}Sr$ ont été réalisées dans différents chondres. Les résultats sont présentés dans le doc. 2. Le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr, avec une constante de désintégration λ égale à $1{,}42.10^{-11}$ an^{-1}.

L'âge t d'une chondrite peut être déterminé à partir des rapports isotopiques $^{87}Sr/^{86}Sr$ et $^{87}Rb/^{86}Sr$ et de l'équation suivante :

$$[^{87}Sr / {}^{86}Sr]_t = (e^{\lambda t} - 1)\,[^{87}Rb / {}^{86}Sr]_t + {}^{87}Sr_0 / {}^{86}Sr_0$$

1. Une météorite chondritique. Ce type de météorite contient de petites sphères de minéraux (de 0,1 à 10 mm de diamètre) appelées chondres.

	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
Chondre 1	0,00017	0,69877
Chondre 2	0,00075	0,69889
Chondre 3	0,00393	0,69899
Chondre 4	0,00432	0,69903
Chondre 5	0,00660	0,69925
Chondre 6	0,00853	0,69933
Chondre 7	0,05213	0,70214

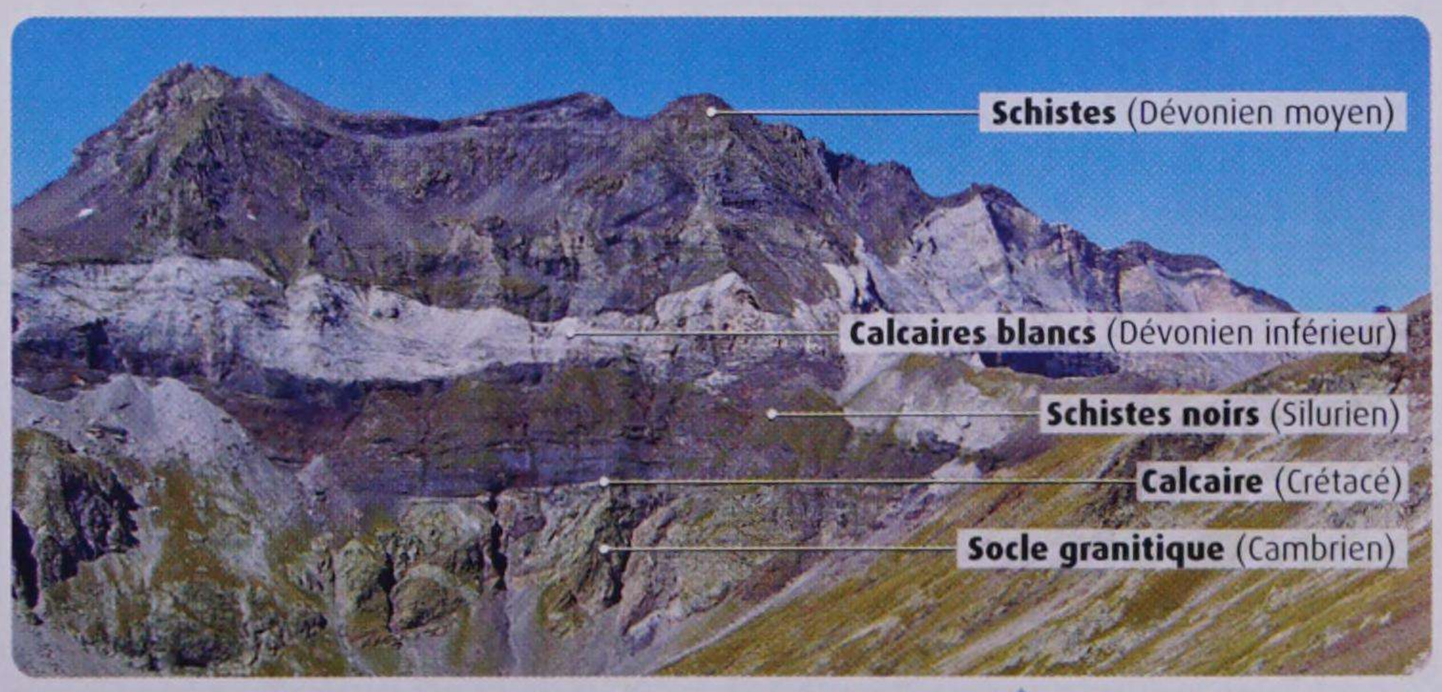
2. Mesure des rapports isotopiques du rubidium (Rb) et du strontium (Sr) dans les chondres de la météorite Allende.

1. Expliquez le principe de la méthode de datation par le radiochronomètre rubidium-strontium.
2. Tracez le graphique du rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de $^{87}Rb/^{86}Sr$.
3. Déterminez graphiquement la pente de la droite isochrone et calculez l'âge de la météorite.
4. D'autres météorites ont permis de dater la formation de la Terre à 4,56 milliards d'années. Comparez l'âge de la météorite d'Allende avec celui de la Terre et avec celui des plus anciennes roches de la croûte continentale.

6 La nappe de Gavarnie (Pyrénées)

Mettre en relation des informations avec ses connaissances

Dans les Pyrénées centrales, l'étude des roches dans le cirque de Barrosa suggère la présence d'une nappe de charriage : la nappe de Gavarnie. Elle a une largeur d'environ 100 km et a été déplacée du Nord vers le Sud sur près de 10 km.



1. La falaise nord du cirque de Barrosa. Le calcaire crétacé s'est déposé sur le socle dans une mer peu profonde au début de la formation des Pyrénées.

1. À partir du doc. 1 et de l'échelle stratigraphique sur le rabat de couverture, schématisez la succession verticale des différentes couches de roches.
2. Dites en quoi les données suggèrent que la nappe de Gavarnie est une nappe de charriage.
3. Localisez la nappe de charriage sur votre schéma ainsi que la zone de contact anormal.
4. Déterminez la ou les conséquences de la formation de la nappe de Gavarnie sur l'épaisseur de la croûte continentale dans les Pyrénées.

EXERCICES

Appliquer ses connaissances

7 Croûte océanique et croûte continentale

Effectuer une synthèse des connaissances

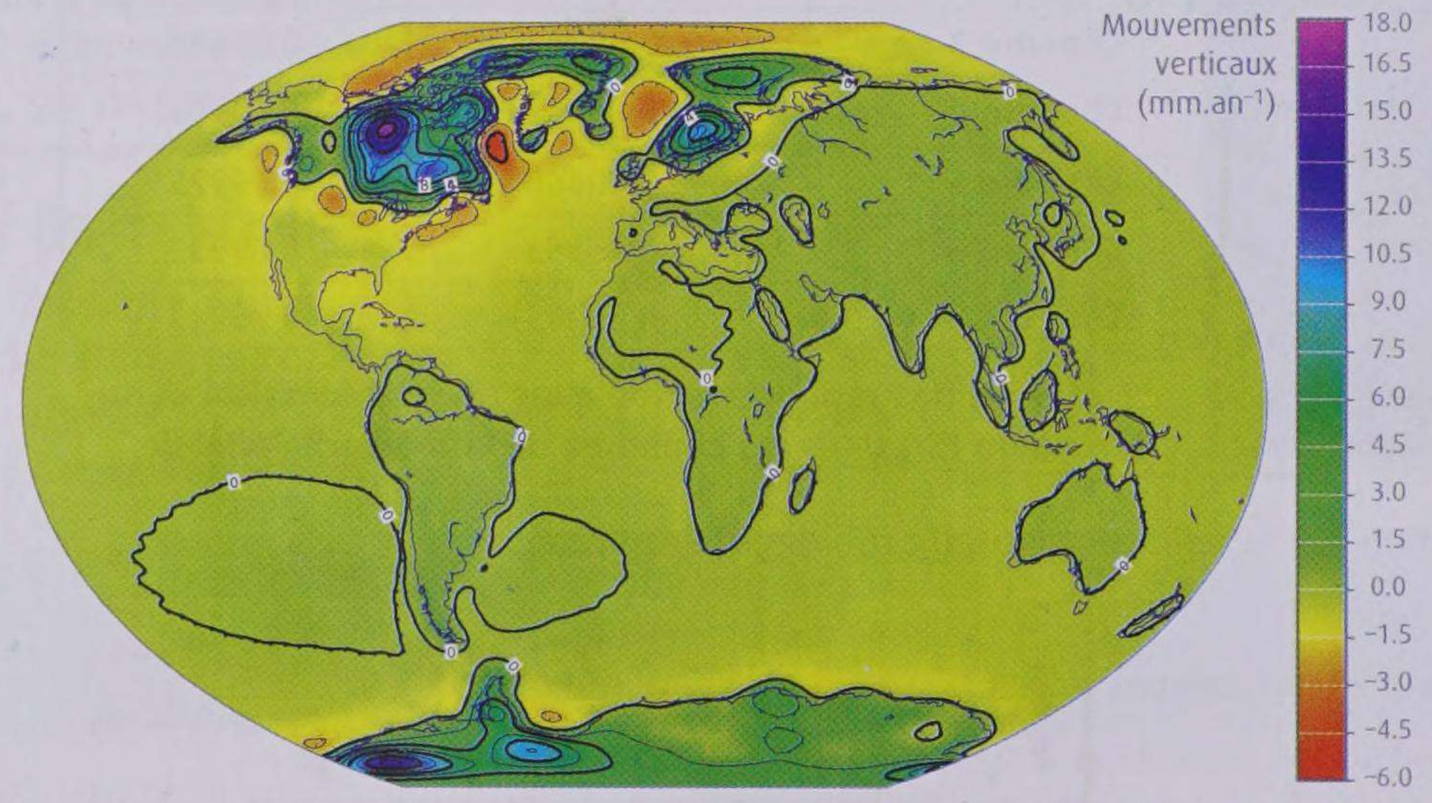
La croûte continentale affleure dans les domaines émergés. Par cette caractéristique notamment, elle se distingue de la croûte océanique.

Vous exposerez les principales caractéristiques de la croûte continentale et vous montrerez en quoi certaines d'entre elles expliquent les différences d'altitude moyenne entre les océans et les continents.

8 Le rebond post-glaciaire

Adopter une démarche explicative

Grâce à la connaissance des propriétés des différentes enveloppes terrestres et de certains événements qui ont marqué l'histoire de notre planète, on est aujourd'hui capable de modéliser les mouvements verticaux de la croûte liés à un phénomène appelé « rebond post-glaciaire ». Le planisphère ci-dessous représente les résultats de cette modélisation.



1. Résultats d'une modélisation des mouvements verticaux actuels de la croûte liés au rebond post-glaciaire.

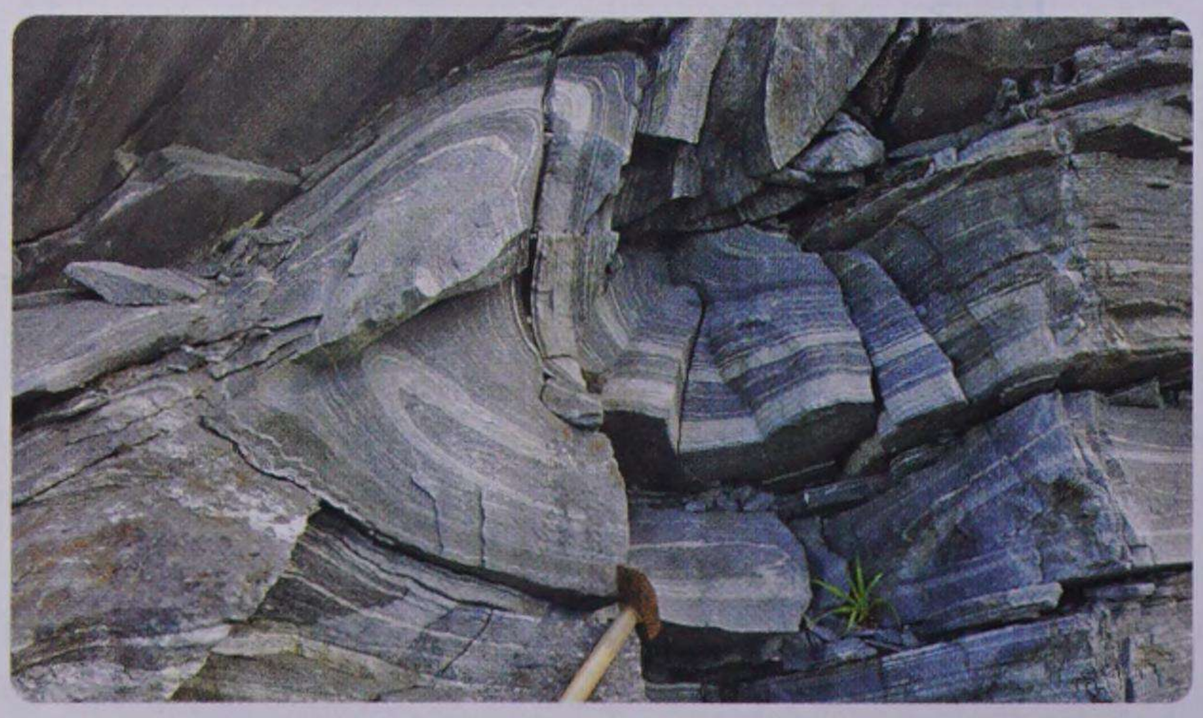
1. Décrivez la distribution des zones de soulèvement crustal puis, à l'aide de vos connaissances, expliquez le mouvement de soulèvement et justifiez l'expression « rebond post-glaciaire ».

2. Commentez la distribution des zones d'enfoncement crustal puis formulez une hypothèse permettant d'expliquer ce mouvement.

2. Évolution de la calotte glaciaire sur l'hémisphère Nord entre – 21 000 ans et nos jours.

9 Les gneiss de Bergen

Saisir des informations



1. Affleurement de gneiss à Bergen (Norvège).

A partir de l'observation de l'affleurement, dégagez des indices d'un épaississement de la croûte continentale.

CHAPITRE 2

La formation des chaînes de montagnes

Dans les chaînes de montagnes, la croûte continentale est épaissie. Cet épaississement est dû à un raccourcissement et à un empilement de terrains, qui témoignent de déplacements horizontaux. Ces déplacements peuvent s'expliquer dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques.

Image satellite du massif des Alpes.

Dans quel contexte géodynamique les chaînes de montagnes se forment-elles ?

UNITÉ 1

Des lambeaux de lithosphère océanique

Au cœur des chaînes de montagnes, on observe des roches appelées ophiolites, interprétées comme des lambeaux de lithosphère océanique. Leur étude fournit des informations concernant la formation des chaînes de montagnes.

En quoi l'étude des ophiolites renseigne-t-elle sur la formation des chaînes de montagnes ?

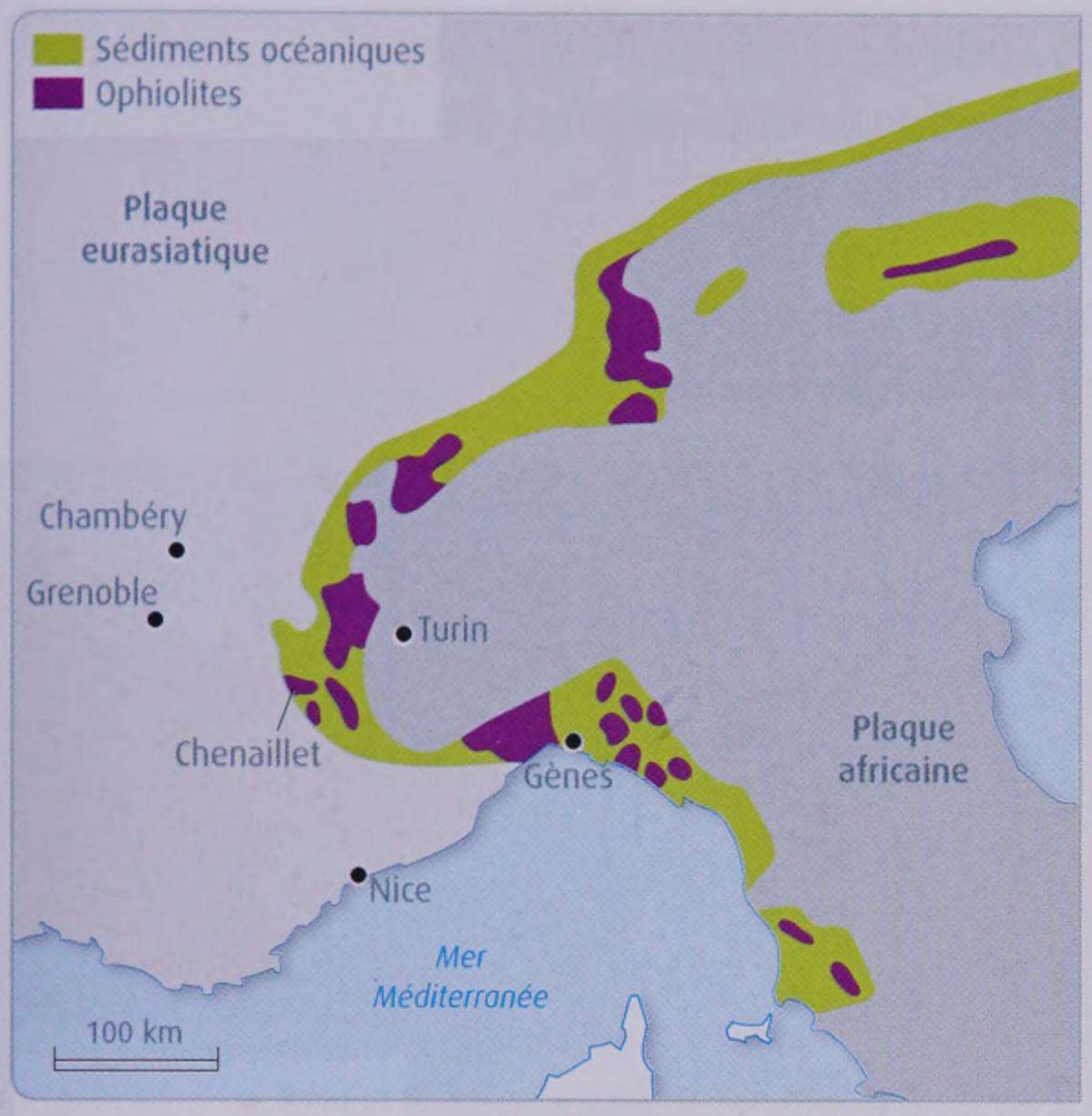
Repérer et identifier des roches à l'affleurement

SORTIE DE TERRAIN

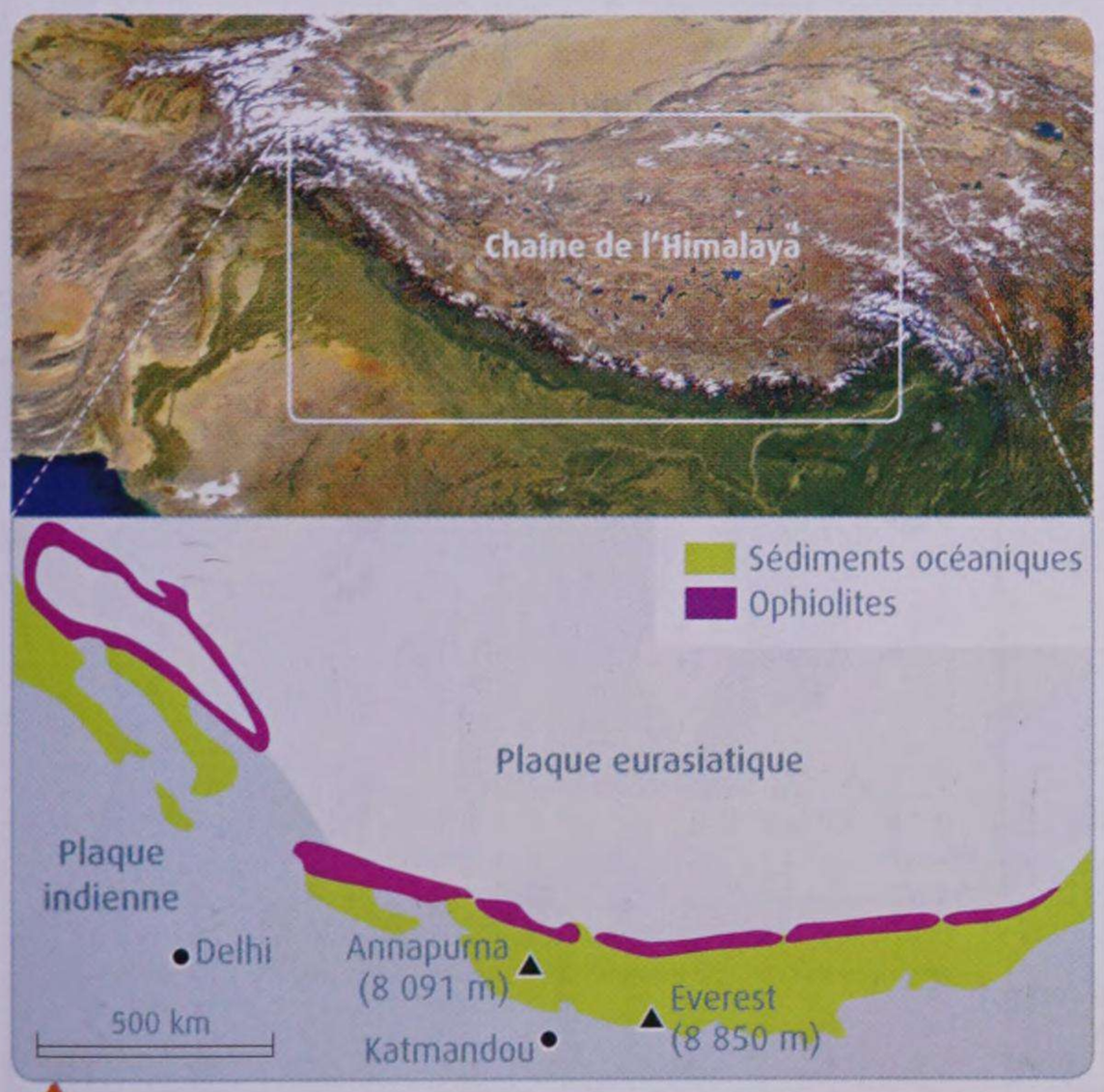
1 Le panorama du Chenaillet dans les Alpes françaises.
Le massif du Chenaillet culmine à 2 650 m d'altitude (localisation : voir doc. 3). Les numéros renvoient au doc. 2 ci-dessous.

2 Les roches observées à l'affleurement au Chenaillet. a. Près du sommet, affleure un empilement de laves en coussins ; il s'agit de basaltes (zone 3 du doc. 1). **b.** Sur l'arête (zone 2 du doc. 1), on observe des gabbros, parfois recoupés de filons de basalte. **c.** Au pied de l'arête (zone 1 du doc. 1), la serpentinite affleure ; cette roche résulte de la transformation d'une péridotite par hydratation. L'association des basaltes, des gabbros et de la serpentinite constitue une ophiolite. **d.** Sur l'ophiolite, on observe par endroits des radiolarites ; ces roches datées de – 180 à – 170 Ma proviennent d'une accumulation de sédiments à grande profondeur en milieu océanique.

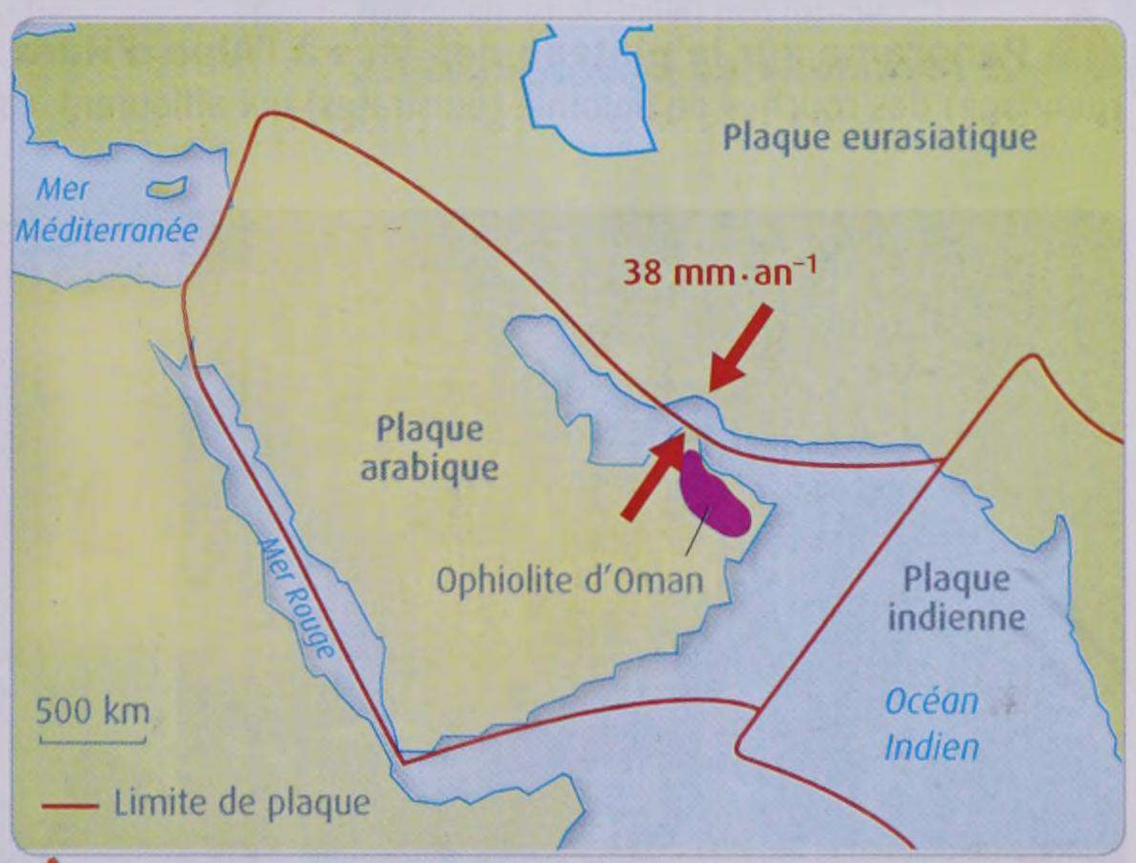
Localiser les ophiolites au sein des chaînes de montagnes



3 Localisation simplifiée des ophiolites dans la chaîne des Alpes. Les Alpes forment un arc de 1 200 km de longueur orienté NE-SW.



4 Localisation simplifiée des ophiolites dans la chaîne de l'Himalaya. L'Himalaya forme un arc de 2 900 km de longueur orienté E-W, situé entre l'Inde et l'Asie.



5 L'ophiolite d'Oman. Cette ophiolite est une nappe de lithosphère océanique de la plaque eurasiatique charriée sur la lithosphère continentale en raison du rapprochement de la plaque arabique et de la plaque eurasiatique. Ce processus est qualifié d'obduction. Les géologues prévoient que, dans deux millions d'années, l'océan aura disparu et qu'une suture entre lithosphères continentales se produira. L'ophiolite d'Oman sera alors dispersée en fragments.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 2.** Dégagez les arguments montrant que les ophiolites sont des lambeaux de lithosphère océanique.
2. **DOC. 3 ET 4.** Décrivez la localisation des ophiolites dans les Alpes et l'Himalaya par rapport aux plaques lithosphériques en présence et formulez des hypothèses permettant d'expliquer cette localisation.
3. **DOC. 5.** Confrontez vos hypothèses aux observations effectuées en Oman.
4. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les informations apportées par l'étude des ophiolites dans les chaînes de montagnes et montrez que leur présence témoigne d'un phénomène de convergence lithosphérique.

UNITÉ 2

Des vestiges de marges continentales

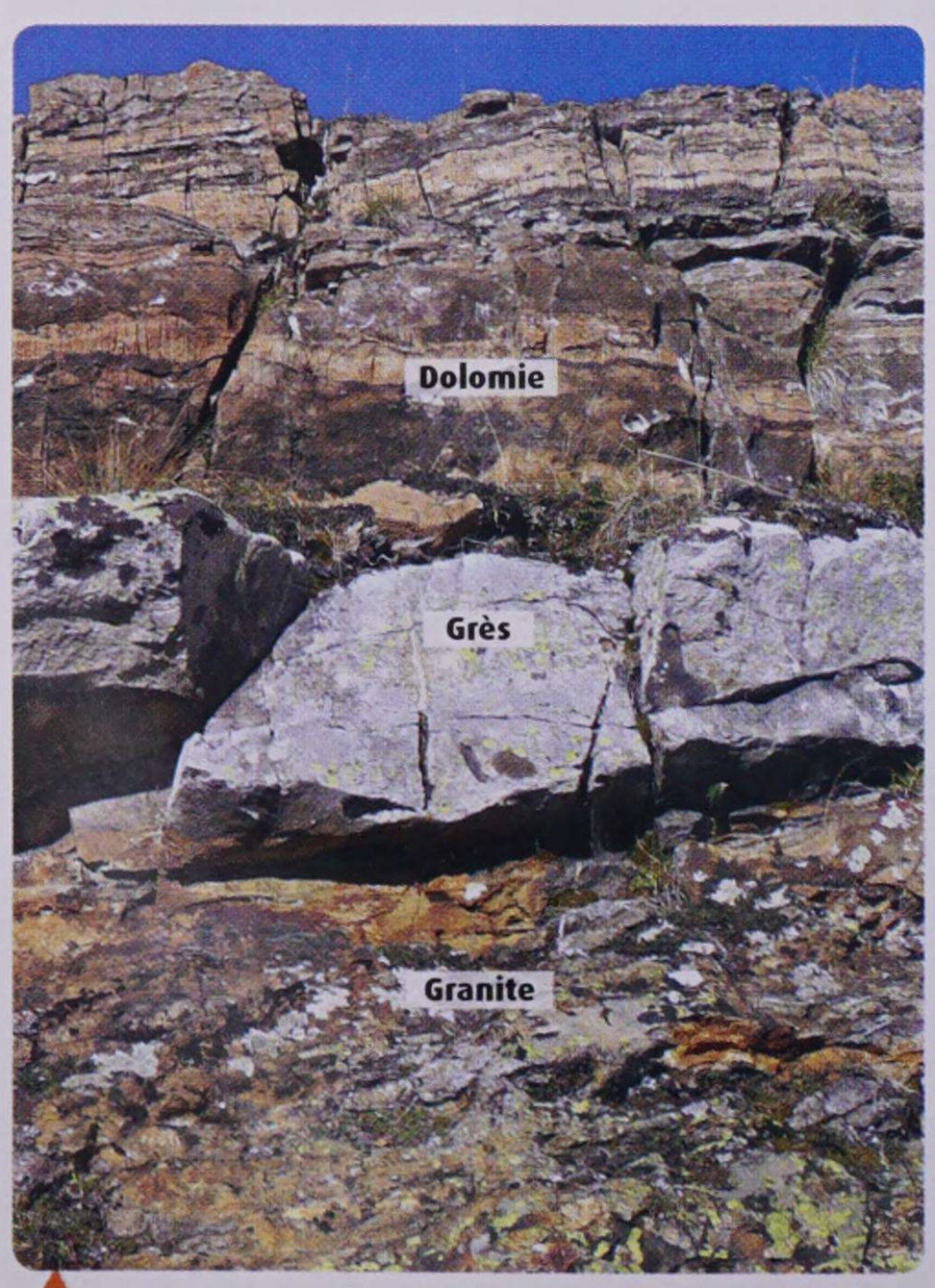
Les ophiolites qui affleurent au cœur des chaînes de montagnes sont des vestiges d'un domaine océanique. Cet océan était bordé par des marges continentales passives.

En quoi l'étude de vestiges de marges continentales renseigne-t-elle sur la formation des chaînes de montagnes ?

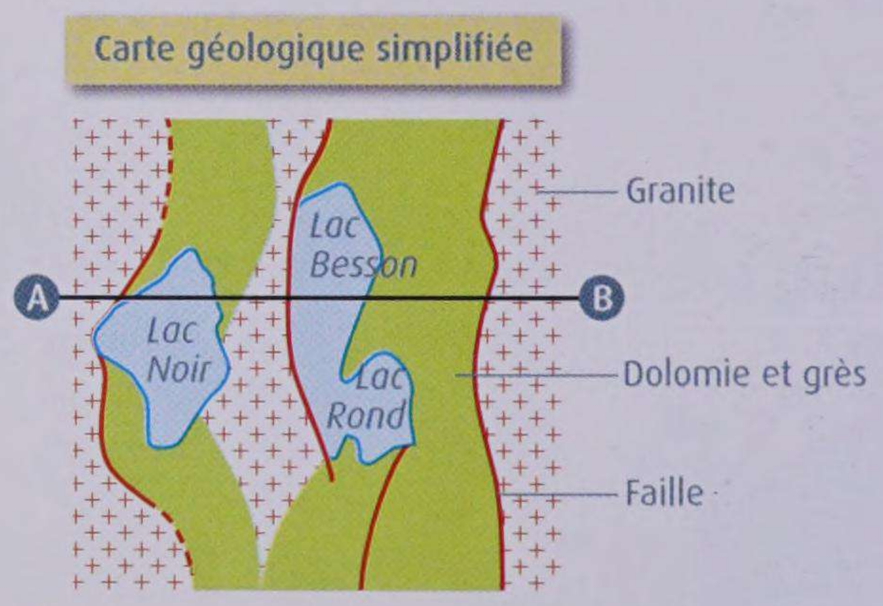
Identifier une ancienne marge continentale passive

SORTIE DE TERRAIN

1 Panorama sur le plateau des lacs à l'Alpe d'Huez (Alpes occidentales, voir doc. 5). Les pointillés montrent l'inclinaison (pendage) des couches de dolomie (ou strates) qui affleurent. La roche grise et dénudée correspond à du granite.



2 Les relations entre les roches à l'affleurement sur le plateau des lacs.
Le granite est âgé de 330 Ma. Dolomie et grès sont deux roches sédimentaires âgées de 245 Ma.
La dolomie, qui est une forme de calcaire, présente ici une succession de couches (ou strates). Elle surmonte un banc de grès.



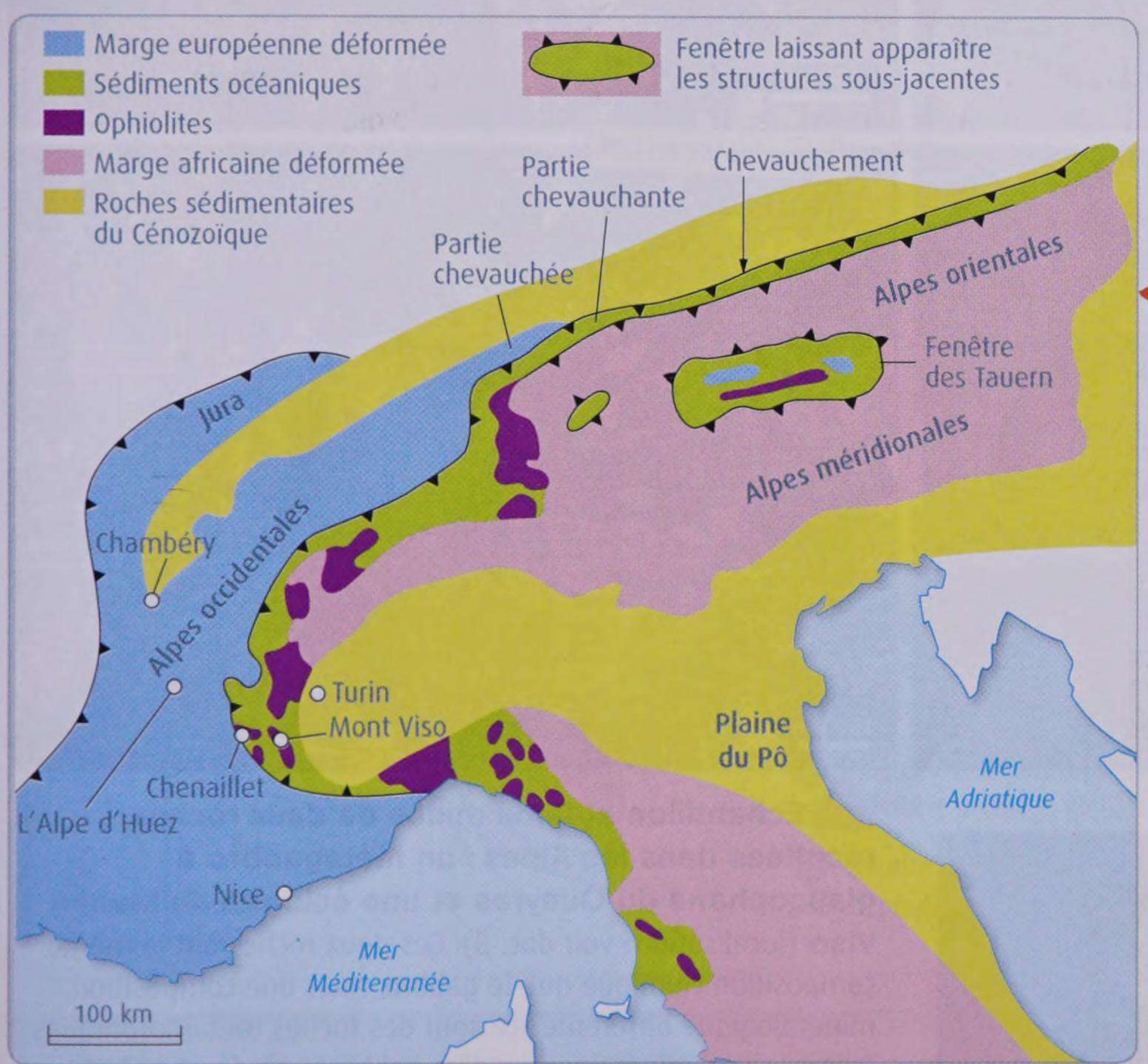
3 Profil topographique à compléter du secteur du plateau des lacs. Les traits rouges matérialisent les plans de faille.

Localiser d'anciennes marges continentales dans les Alpes

4 Un paysage des Alpes méridionales : les *Tre Cime di Lavaredo* dans les Dolomites. Les Alpes méridionales (voir doc. 5) sont constituées d'une couche de dolomie épaisse de 3 km et âgée de 240 à 250 Ma. Ces roches calcaires se sont déposées en milieu océanique relativement peu profond. Elles sont riches en organismes fossiles vivant sur les plateaux continentaux (coraux, oursins, ammonites, etc.).

Vocabulaire

Chevauchement : structure résultant d'un mouvement tectonique conduisant un ensemble de terrains à en recouvrir un autre par l'intermédiaire d'un contact anormal (faille) peu incliné.



5 Une présentation simplifiée de la chaîne des Alpes. L'étude de la nature et de la structure des formations rocheuses dans les Alpes a permis aux géologues de montrer que cette chaîne de montagnes comprend les vestiges de deux marges continentales. L'une était située sur la plaque eurasiatique (marge européenne), l'autre correspondait à la bordure de la plaque africaine (marge africaine). La région des Alpes orientales est formée par de vastes ensembles de roches sédimentaires de la marge africaine qui ont été charriées : ce sont les « nappes austro-alpines ». L'érosion a, dans certaines régions, creusé des « fenêtres » dans ces nappes de charriage, laissant apparaître à l'affleurement les roches qu'elles ont recouvertes.

ACTIVITÉS

1 **DOC 1 À 3.** Sur le profil topographique du doc. 3, reportez l'emplacement des roches observées doc. 1 et 2 (utilisez les figurés indiqués). Dégagez les arguments suggérant que le paysage étudié est une ancienne marge continentale passive.

2 **DOC. 4.** Indiquez en quoi la nature des roches permet d'interpréter ces reliefs comme un vestige d'une ancienne marge continentale passive.

3 **DOC 5.** Montrez que la disposition relative des formations géologiques des marges africaine et européenne témoigne d'un processus de raccourcissement lithosphérique.

4 **EN CONCLUSION.** Montrez que la présence des marges continentales dans la chaîne alpine témoigne d'un processus de convergence lithosphérique associée à la disparition d'un domaine océanique.

UNITÉ 3

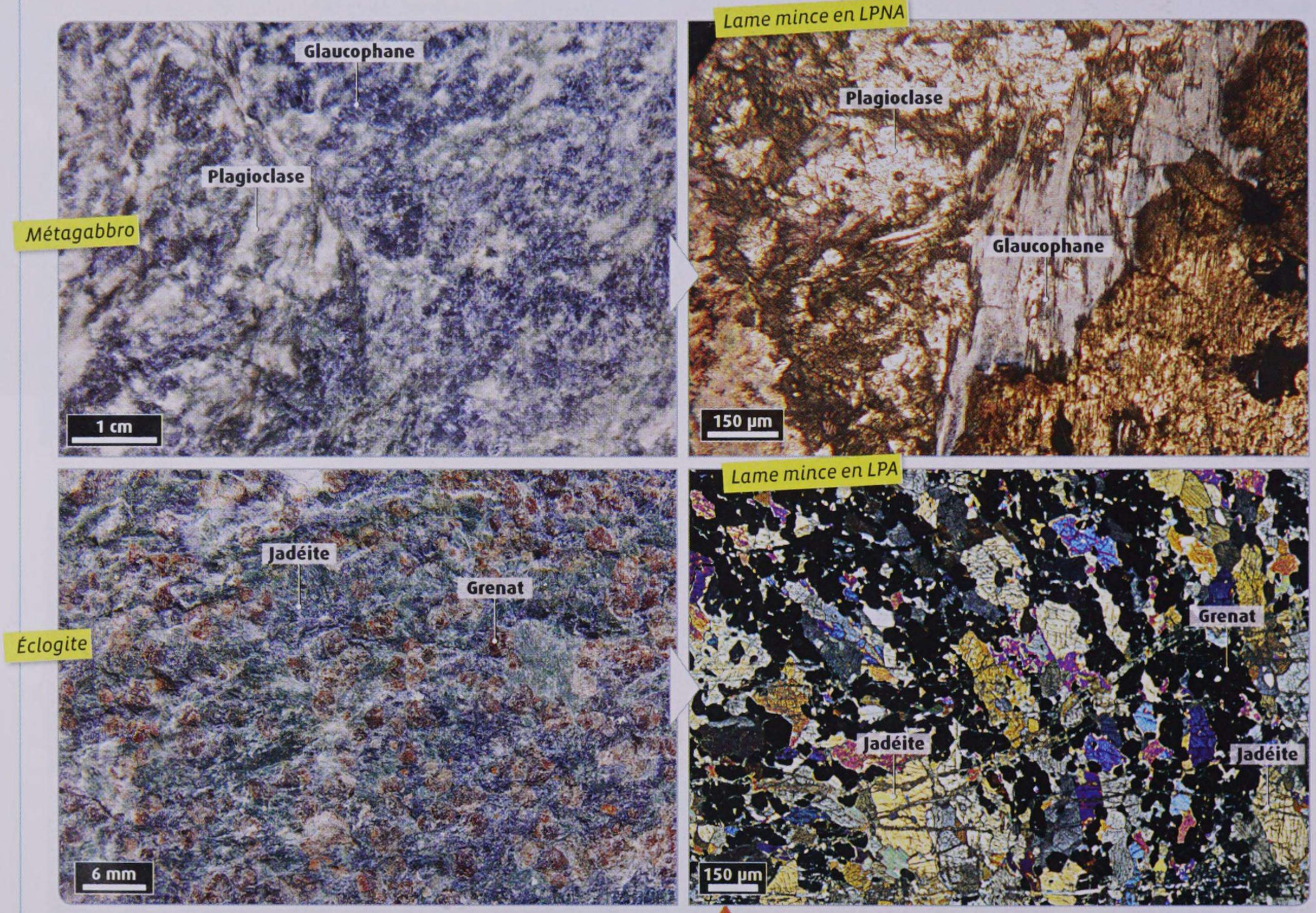
Des transformations minéralogiques

La présence d'ophiolites et de vestiges de marges continentales dans les Alpes montre que leur formation est associée à la disparition d'un domaine océanique.

Comment l'étude de certains minéraux peut-elle témoigner de la disparition du domaine océanique ?

Des indices de transformations minéralogiques

PISTE



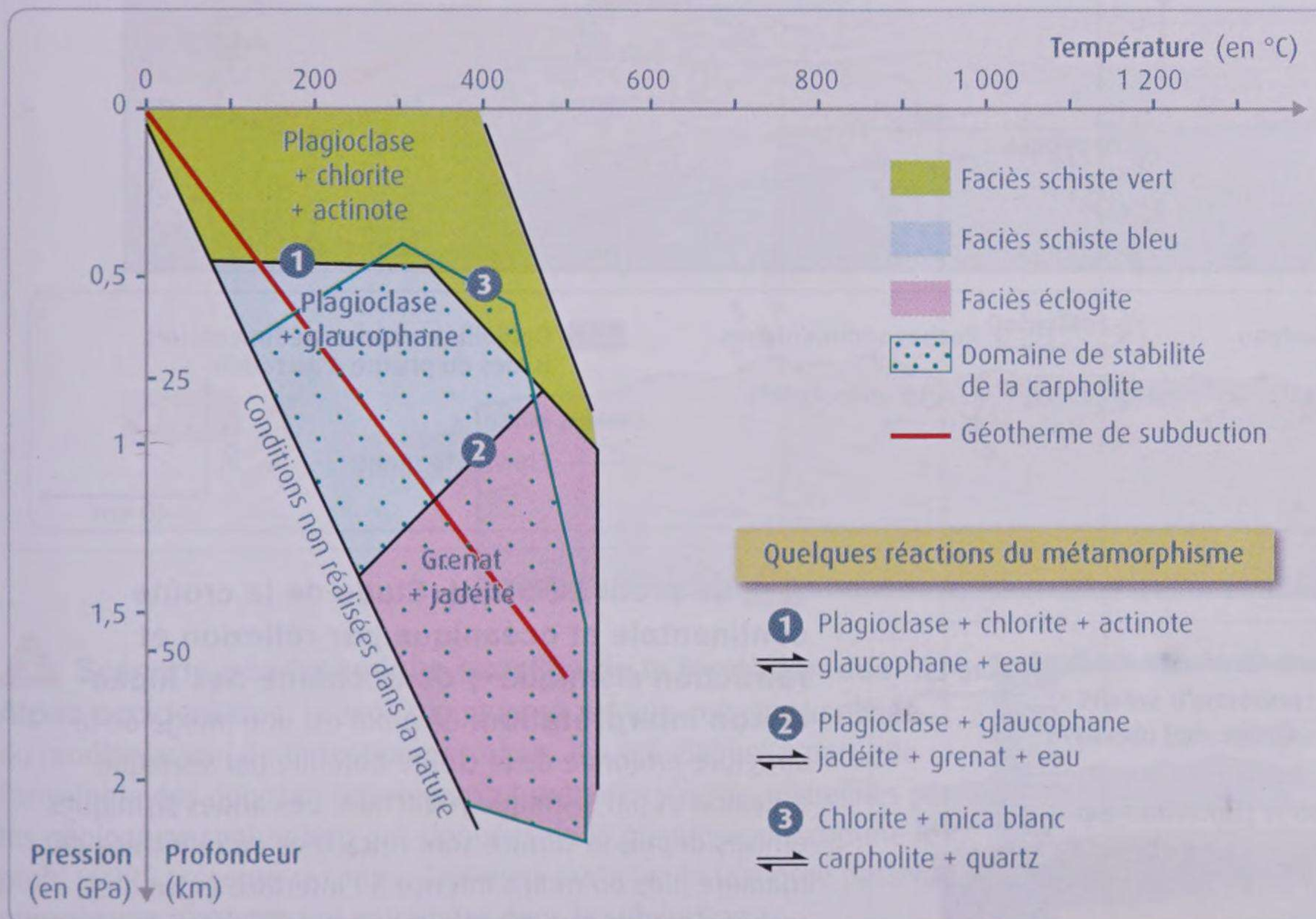
1 Échantillon et lame mince de deux roches récoltées dans les Alpes : un métagabbro à glaucophane du Queyras et une éclogite du Mont Viso (localisation : voir doc. 5). Ces deux roches ont la même composition chimique que le gabbro, mais une composition minéralogique différente : ce sont des roches métamorphiques (composition minéralogique d'un gabbro : voir doc.1 p. 186).

2 Un schiste à carpholite récolté dans les Alpes. Il s'agit d'une roche issue du métamorphisme de roches sédimentaires argileuses d'origine continentale contenant de la chlorite et du mica blanc. Ce dernier est un minéral typique de la croûte continentale.

Le contexte géodynamique des transformations minéralogiques

Au sein d'une roche, les associations de minéraux ne sont stables que dans un domaine précis de pression (P) et de température (T). Au-delà, certains minéraux réagissent entre eux, donnant naissance à de nouveaux minéraux. Ces réactions participent au métamorphisme, c'est-à-dire aux transformations subies par les roches à l'état solide (sans fusion, même partielle) sous l'effet des variations de P et T. La présence de certains minéraux dans une roche permet donc de caractériser les conditions P/T dans lesquelles cette dernière a été portée. En effet, les réactions entre les minéraux sont extrêmement lentes et l'échantillon contient ainsi des minéraux « reliques » des différentes conditions P/T qu'il a rencontrées au cours de son histoire. Une association minéralogique définit un faciès métamorphique.

5 Carte simplifiée des faciès métamorphiques dans les Alpes franco-italiennes.



4 Les domaines de stabilité de quelques associations minéralogiques.
Le géotherme de subduction décrit l'évolution de la température en fonction de la profondeur au niveau d'une zone de subduction. Lorsqu'il s'engage dans un processus de subduction, un gabbro est déjà métamorphisé : il contient du plagioclase, de la chlorite et de l'actinote.

3 Les domaines de stabilité des minéraux.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Dégagez les arguments indiquant que les roches présentées sont issues de roches océaniques ou continentales.

2 **DOC. 1 À 4.** Identifiez les minéraux témoignant de la transformation des roches initiales et les conditions associées à leur formation, puis expliquez en quoi leur présence peut témoigner d'une subduction de matériel océanique ou continental.

3 **DOC. 4 ET 5.** Décrivez la localisation des faciès métamorphiques dans les Alpes, puis déterminez quelle marge, africaine ou européenne, est entrée en subduction.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les arguments montrant qu'une subduction est impliquée dans la disparition du domaine océanique associée à la formation des Alpes.

UNITÉ 4

Un scénario de formation d'une chaîne de montagnes

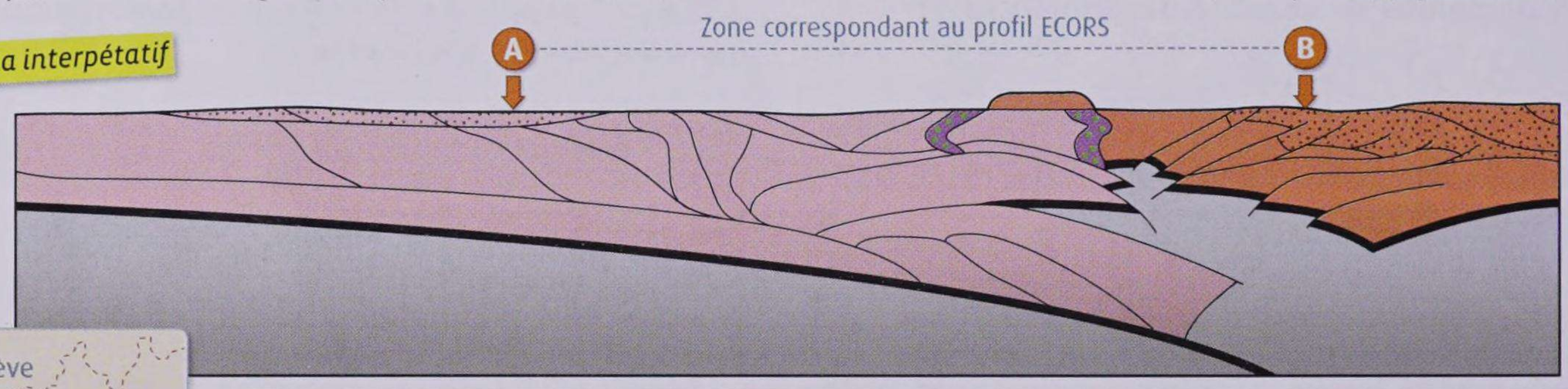
Dans les Alpes, on observe les vestiges d'un ancien océan, les traces d'anciennes marges continentales et des marqueurs minéralogiques de l'enfouissement de matériaux océaniques et continentaux lors d'un processus de subduction.

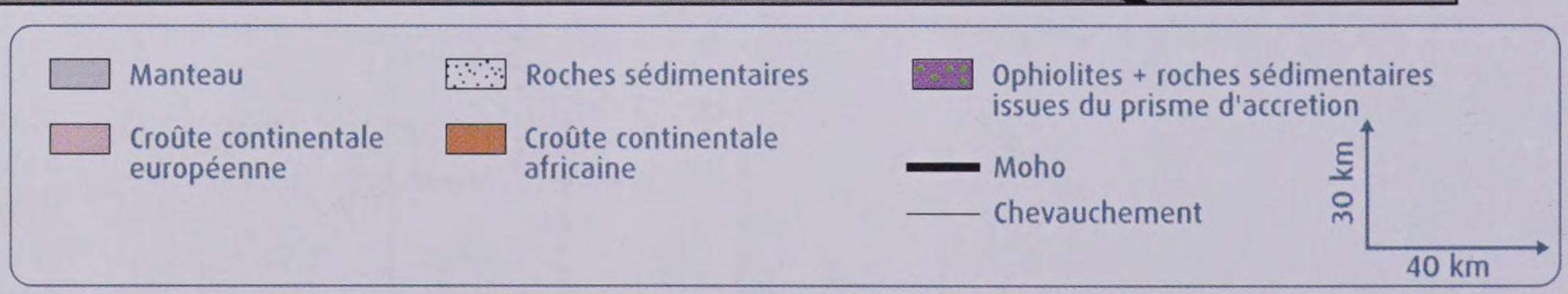
Comment intégrer ces données d'observation dans le modèle de la tectonique de plaques ?

Les apports des données géophysiques

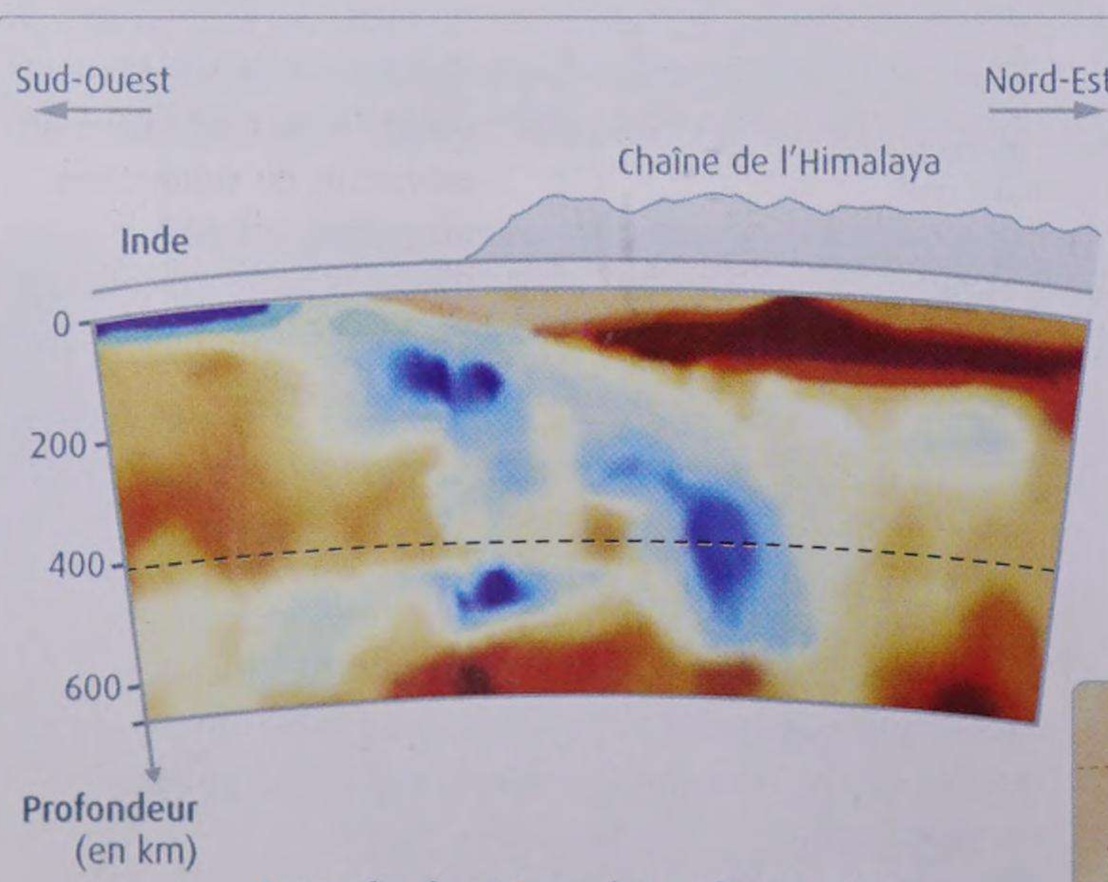
Profil

Schéma interpétatif



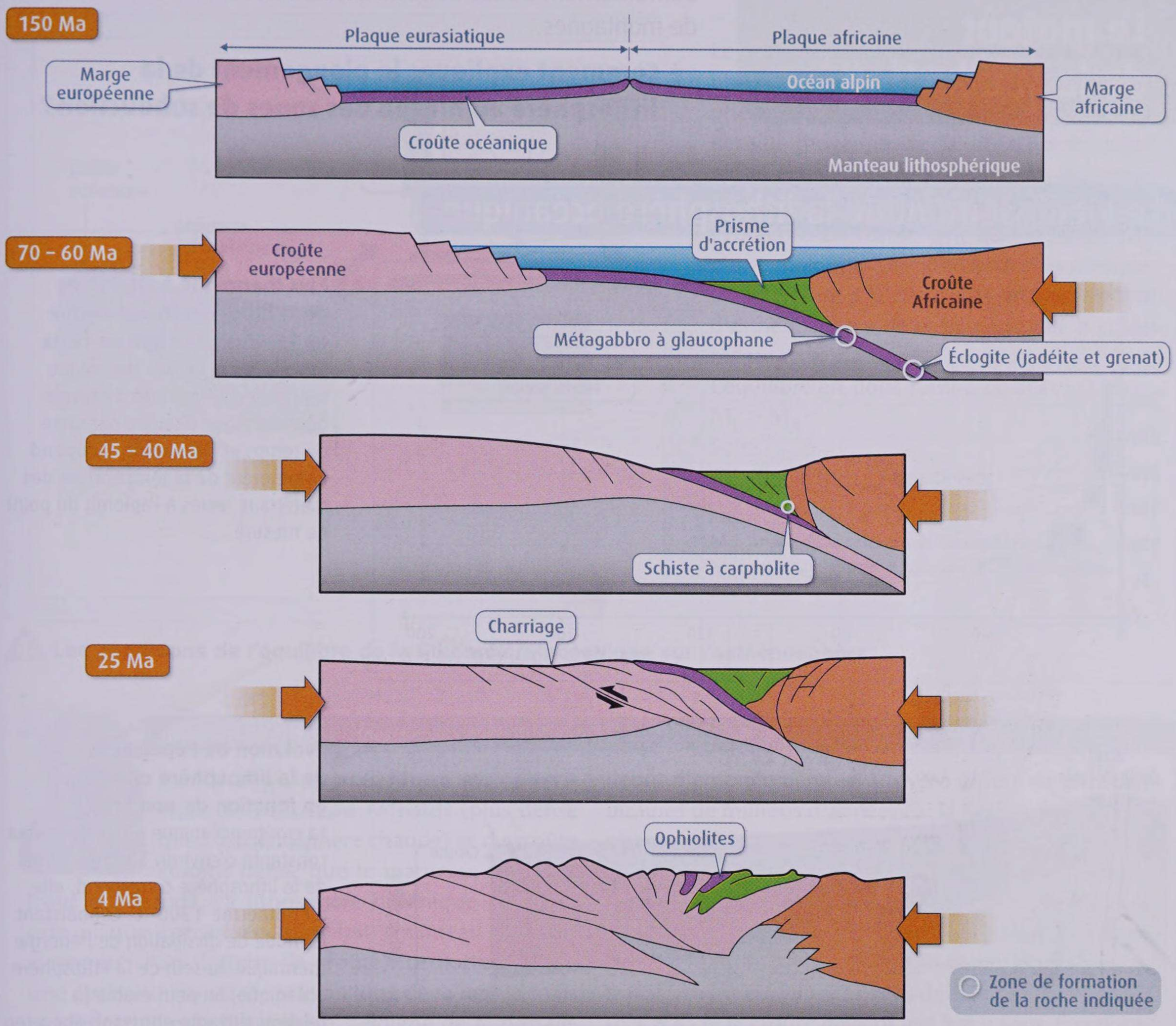


1 Le profil ECORS (« Étude de la croûte continentale et océanique par réflexion et réfraction sismique ») de la chaîne des Alpes et son interprétation. Ce profil est une image de la structure profonde de la croûte obtenue par sismique réflexion et par sismique réfraction. Des ondes sismiques émises depuis la surface sont réfractées ou réfléchies de manière plus ou moins intense à l'interface entre des roches dont les caractéristiques sont différentes. Les ondes réfléchies ou réfractées sont recueillies en surface par des récepteurs et leur analyse permet de localiser des zones de forte réflexion ou de forte réfraction des ondes.



2 Tomographie sismique à travers l'Himalaya. La zone bleue correspond à la lithosphère indienne, de nature continentale pour l'essentiel. (Voir p. 376 le rappel du principe de la tomographie sismique.)

Un scénario de formation d'une chaîne de montagnes



3 Scénario géodynamique simplifié de la formation des Alpes occidentales. Le scénario proposé est une version simplifiée du modèle actuel de formation des Alpes. Il a été élaboré à partir de l'ensemble des données tectoniques et métamorphiques recueillies par les géologues, confrontées aux données de la géophysique, comme le profil ECORS présenté ci-contre. Certaines portions de la marge passive européenne n'ont pas été entraînées dans la subduction.

Vocabulaire

Prisme d'accrétion : superposition d'écailles au front d'une plaque dans certaines zones de subduction. Il résulte du rabotage des sédiments (océaniques et issus de l'érosion des continents) et de fragments de croûte océanique appartenant à la plaque plongeante, qui sont arrêtés par le butoir rigide formé par la plaque chevauchante.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Indiquez l'épaisseur de la croûte continentale dans la zone de contact entre les deux plaques lithosphériques. Expliquez l'origine de l'épaississement.

2 **DOC. 2.** À l'aide d'un schéma d'interprétation de la tomographie, donnez un argument montrant que la lithosphère continentale indienne est en subduction.

3 **DOC. 3.** Identifiez les figures correspondant à trois étapes de la formation de la chaîne alpine : subduction océanique, subduction continentale et collision.

4 **EN CONCLUSION.** Montrez comment les données d'observation présentées unités 1 à 4 permettent d'expliquer la formation des chaînes de montagnes dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques.

UNITÉ 5

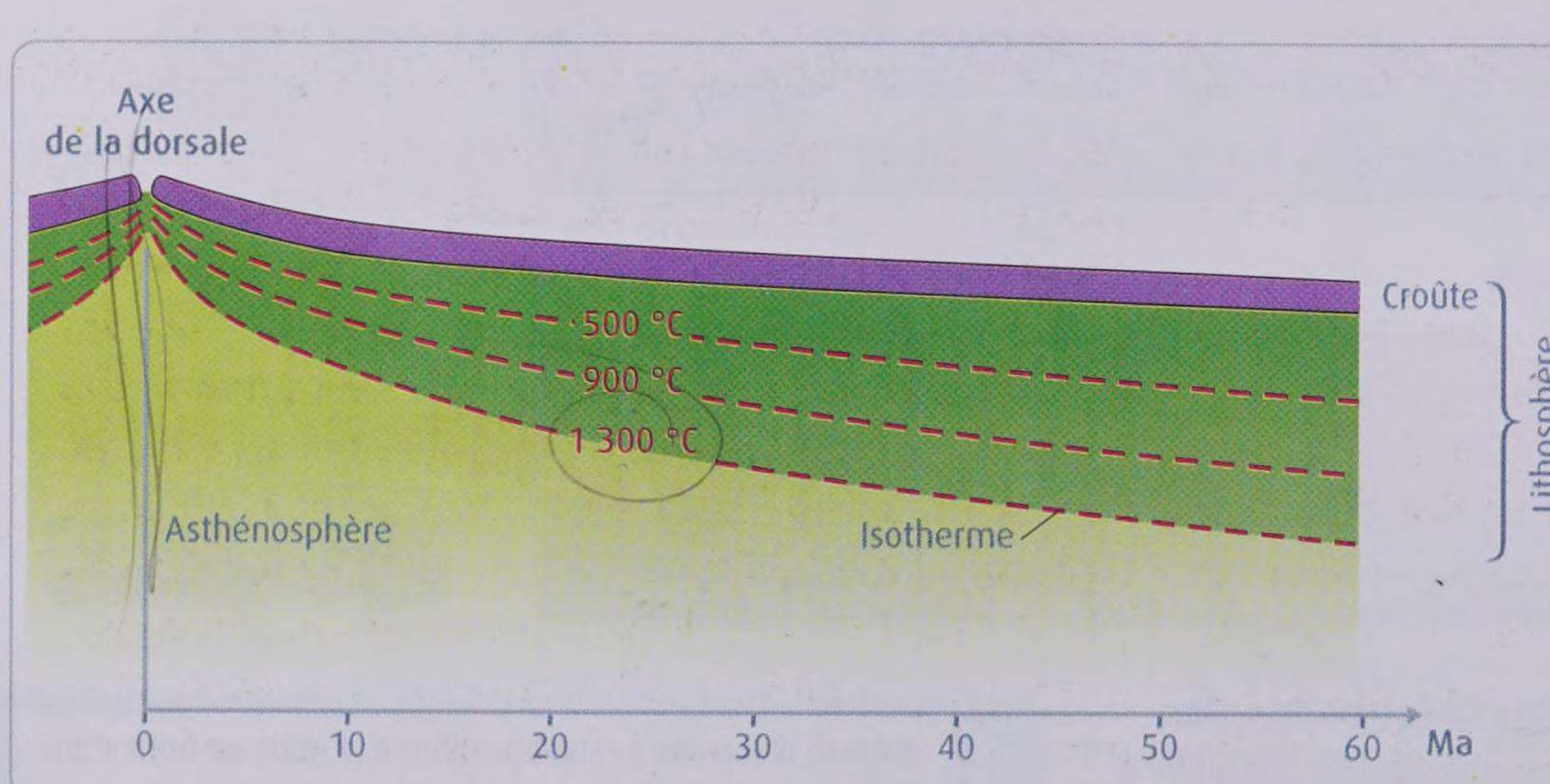
Le moteur de la subduction

La subduction de la lithosphère océanique entraîne la fermeture d'un océan et le rapprochement de deux domaines continentaux. L'affrontement de ces derniers donne naissance à une chaîne de montagnes.

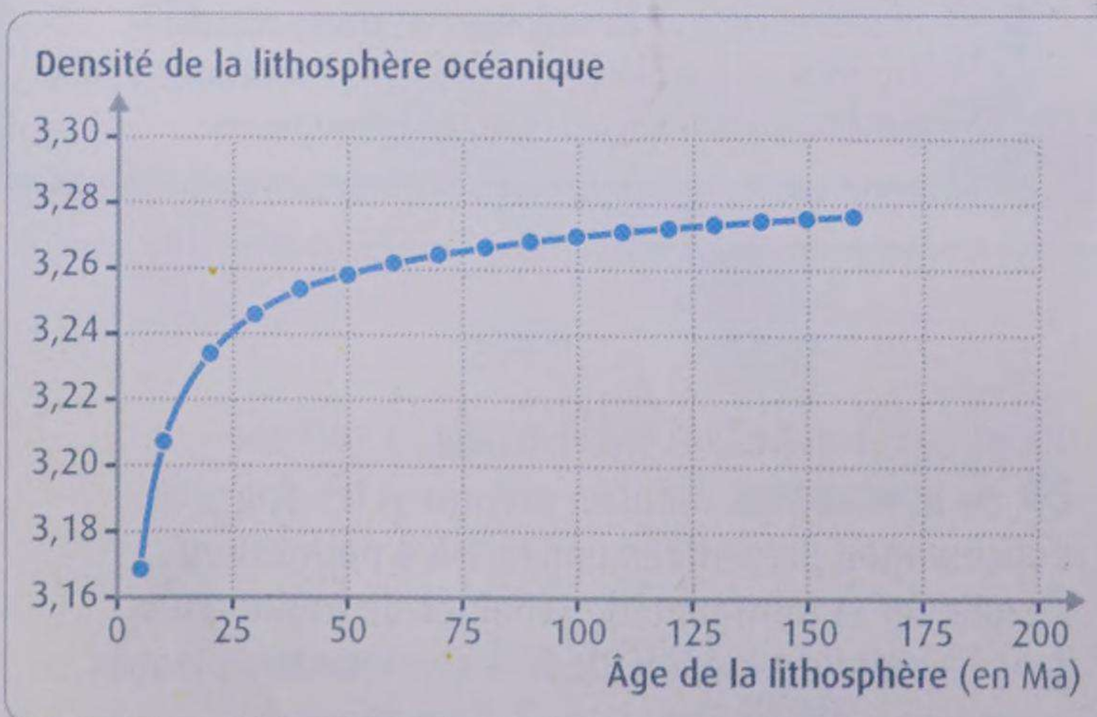
Comment expliquer le plongement de la lithosphère au niveau des zones de subduction ?

Le vieillissement de la lithosphère océanique

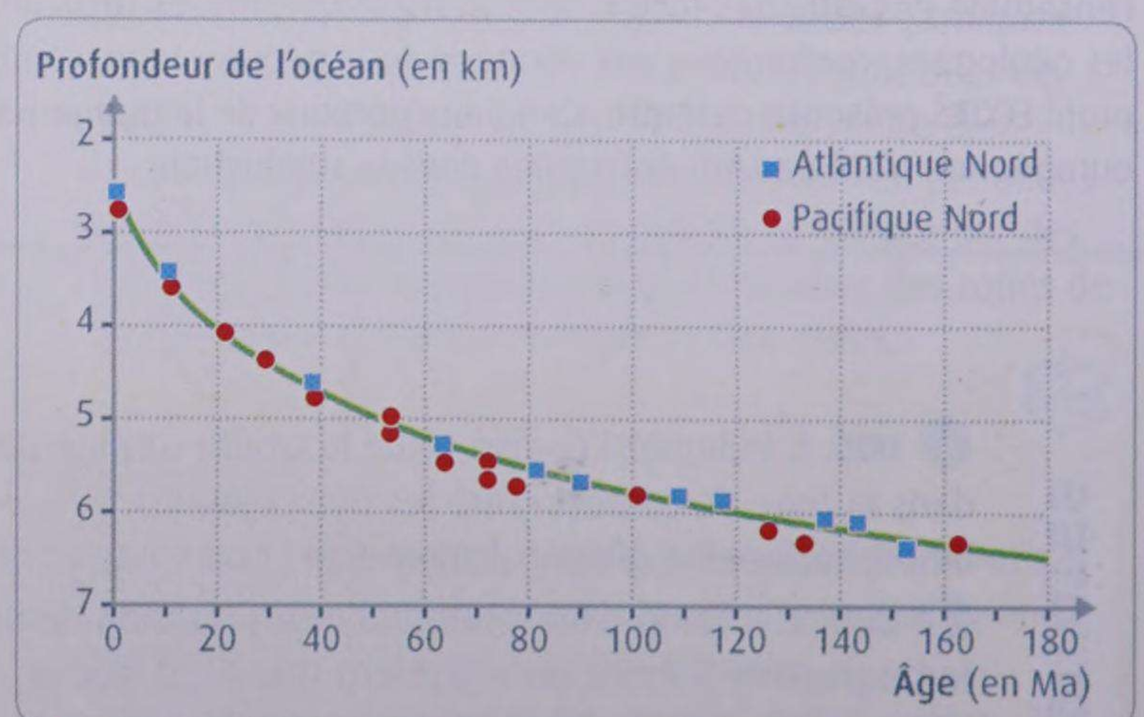
1 Flux thermique à l'aplomb de la lithosphère océanique en fonction de l'âge de cette lithosphère. Le flux thermique représente la quantité d'énergie géothermique dissipée par unité de temps et de surface. Il dépend notamment de la température des matériaux situés à l'aplomb du point de mesure.



2 Évolution de l'épaisseur de la lithosphère océanique en fonction de son âge.
La croûte océanique a une épaisseur constante d'environ 7 km. La base de la lithosphère correspond, elle, à l'isotherme 1 300 °C. Connaissant le mode de dissipation de l'énergie thermique au sein de la lithosphère océanique, on peut établir la relation suivante entre son âge t (en millions d'années) et son épaisseur h_L (en km) : $h_L = 9{,}2\sqrt{t}$.

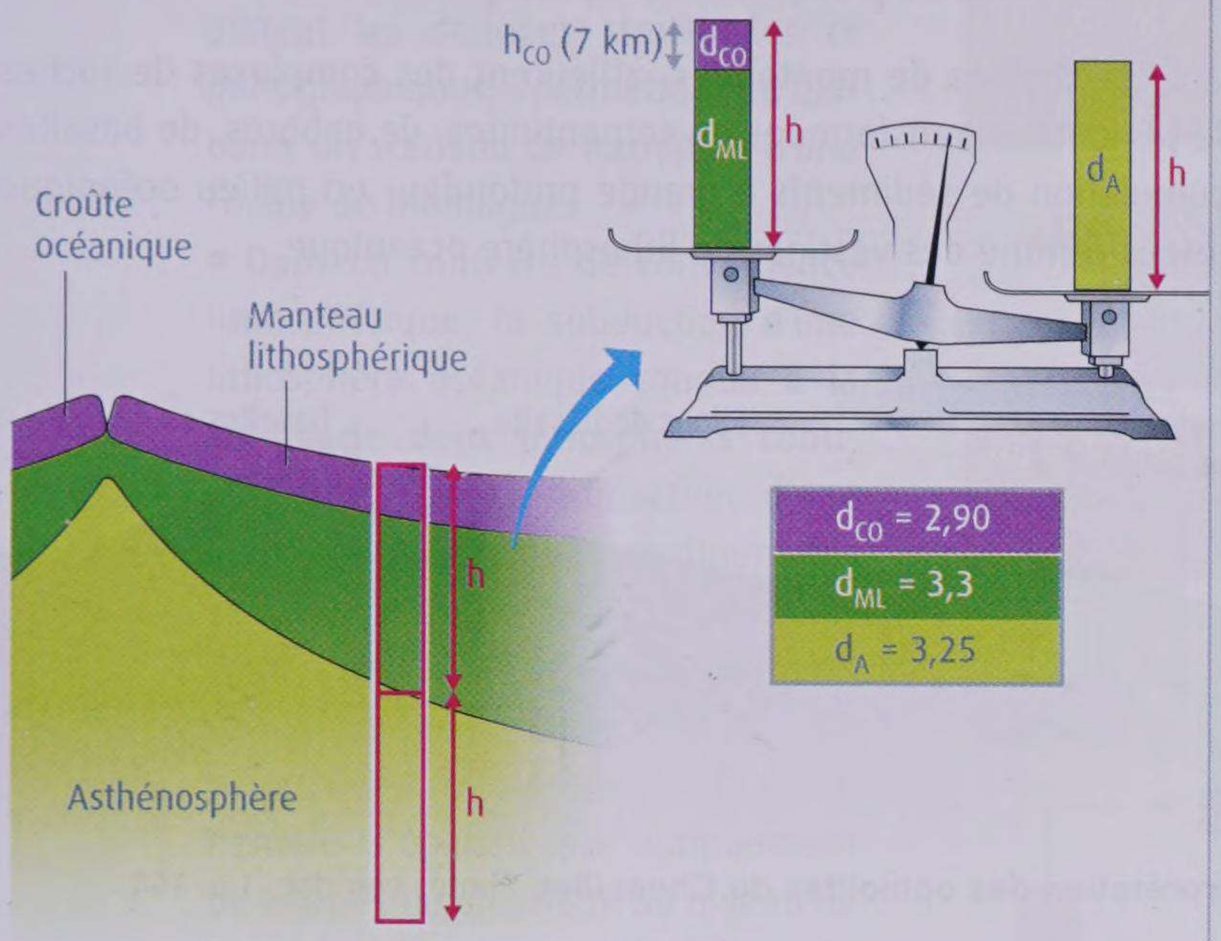


3 Évolution de la densité de la lithosphère océanique en fonction de son âge.



4 Profondeur des océans Atlantique nord et Pacifique nord en fonction de l'âge de la lithosphère océanique.

Les conséquences du vieillissement de la lithosphère océanique



Le principe d'isostasie énonce que la lithosphère repose en équilibre sur l'asthénosphère. Cet équilibre est réalisé tant que la densité moyenne de la lithosphère océanique est inférieure à la densité moyenne de l'asthénosphère. Cela revient à dire que l'équilibre est réalisé tant que la masse M_L d'une colonne de lithosphère océanique est inférieure à la masse M_A d'une colonne d'asthénosphère de même hauteur h et de même section.

L'équilibre est donc rompu quand :

$M_L > M_A$

Soit :

$(h_{co}d_{co}) + (h-h_{co})\, d_{ML} > hd_A$

avec :

M_L : masse de la colonne de lithosphère

M_A : masse de la même colonne d'asthénosphère

d : densité

5 Les conditions de l'équilibre de la lithosphère océanique sur l'asthénosphère.

Interview de **Pierre Thomas**, géologue.

La lithosphère océanique est constituée de manteau refroidi (plus dense que l'asthénosphère chaude) et de croûte (moins dense que le manteau, qu'il soit froid ou chaud). La lithosphère océanique est donc une plaque constituée d'un lest (manteau refroidi) surmonté d'un flotteur (la croûte). Le flotteur garde une épaisseur constante tout au long de sa dérive, mais pas le lest. Plus la lithosphère s'éloigne de la dorsale, plus elle perd de la chaleur, plus le lest s'épaissit et s'alourdit. Au bout d'un certain temps, le poids du lest devient théoriquement suffisant pour amorcer la subduction, malgré le flotteur. Dans la nature, ce début d'enfoncement est souvent différé de plusieurs dizaines de millions d'années car la flexion de la lithosphère, sa fracturation et la résistance de l'asthénosphère exercent une résistance mécanique à l'amorce de la subduction et à l'enfoncement. Mais une fois la subduction amorcée, tout s'emballe. Sous l'effet de l'augmentation de la pression, basaltes et gabbros se transforment en éclogites, plus denses que le manteau (d = 3,4) et la croûte devient lest à son tour. En conséquence, la densité de la lithosphère plongeante augmente encore. Dès que la lithosphère s'est enfoncée, elle tracte ainsi le reste de la plaque lithosphérique : la subduction est entretenue.

6 Qu'est-ce qui fait plonger une plaque lithosphérique ?

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Décrivez puis expliquez l'évolution de l'épaisseur de la lithosphère océanique lors de son vieillissement.

2 **DOC. 2 À 4.** Décrivez puis expliquez l'évolution de la densité et de la subsidence (enfoncement) de la lithosphère océanique au cours du temps.

3 **DOC. 5.** Déterminez l'épaisseur de la lithosphère au seuil de rupture de l'équilibre, puis à l'aide du doc. 2, calculez l'âge de la lithosphère correspondant.

4 **DOC. 6.** Sur une représentation schématique d'une coupe de lithosphère océanique depuis la dorsale jusqu'à une zone de subduction, résumez l'enchaînement des événements qui aboutit à la plongée de la lithosphère océanique.

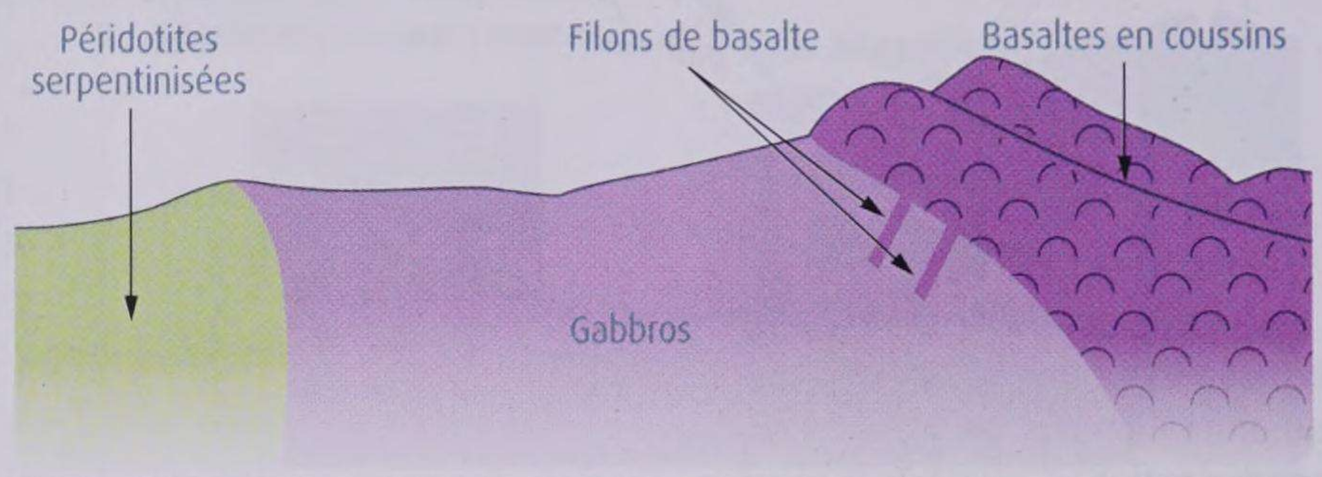
5 **EN CONCLUSION.** Expliquez la plongée de la lithosphère dans l'asthénosphère au niveau des zones de subduction.

CHAPITRE 2 La formation des chaînes de montagnes

UNITÉ 1 Des lambeaux de lithosphère océanique

• Dans les Alpes, comme dans la plupart des chaînes de montagnes, affleurent des complexes de roches appelés ophiolites, qui sont constitués de péridotites transformées en serpentinites, de gabbros, de basaltes en coussins et de roches issues de l'accumulation de sédiments à grande profondeur en milieu océanique (radiolarites). Les ophiolites sont interprétées comme des vestiges de lithosphère océanique.

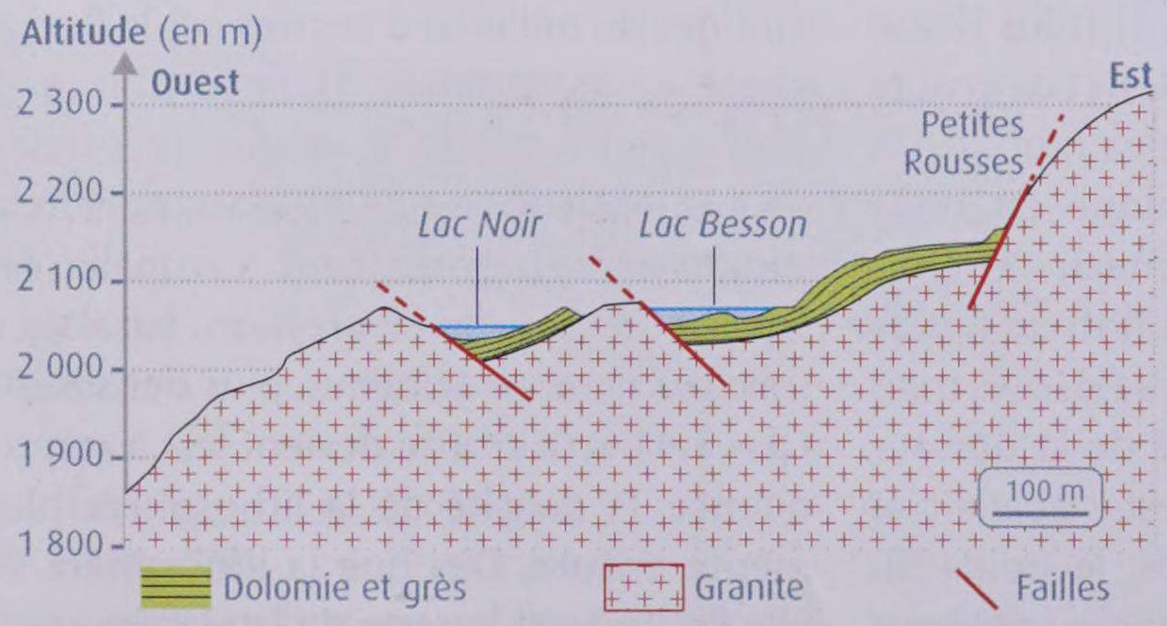
• Les ophiolites sont situées au cœur des chaînes de montagnes, à la frontière entre deux plaques lithosphériques. Cette localisation suggère que la formation d'une chaîne de montagnes est associée à la disparition d'un domaine océanique par subduction dans un contexte de convergence entre deux plaques lithosphériques.



L'interprétation des ophiolites du Chenaillet. Photo : voir doc. 1 p. 164.

UNITÉ 2 Des vestiges de marges continentales

• Dans les Alpes, comme dans la plupart des chaînes de montagnes, on observe la présence de deux anciennes marges continentales passives. Dans la chaîne alpine, l'une appartient à la plaque eurasiatique, l'autre à la plaque africaine. Plus ou moins déformées, ces marges sont cependant identifiables grâce à des arguments structuraux et pétrographiques (présence de blocs basculés séparés par des failles normales et/ou de sédiments de milieux océaniques peu profonds caractéristiques des marges passives).



Profil topographique d'une ancienne marge passive à l'Alpe d'Huez.

• Le rapprochement au sein d'un même massif montagneux de deux marges continentales autrefois séparées par un océan témoigne également du contexte de convergence entre deux plaques lithosphériques associé à la formation d'une chaîne de montagnes.

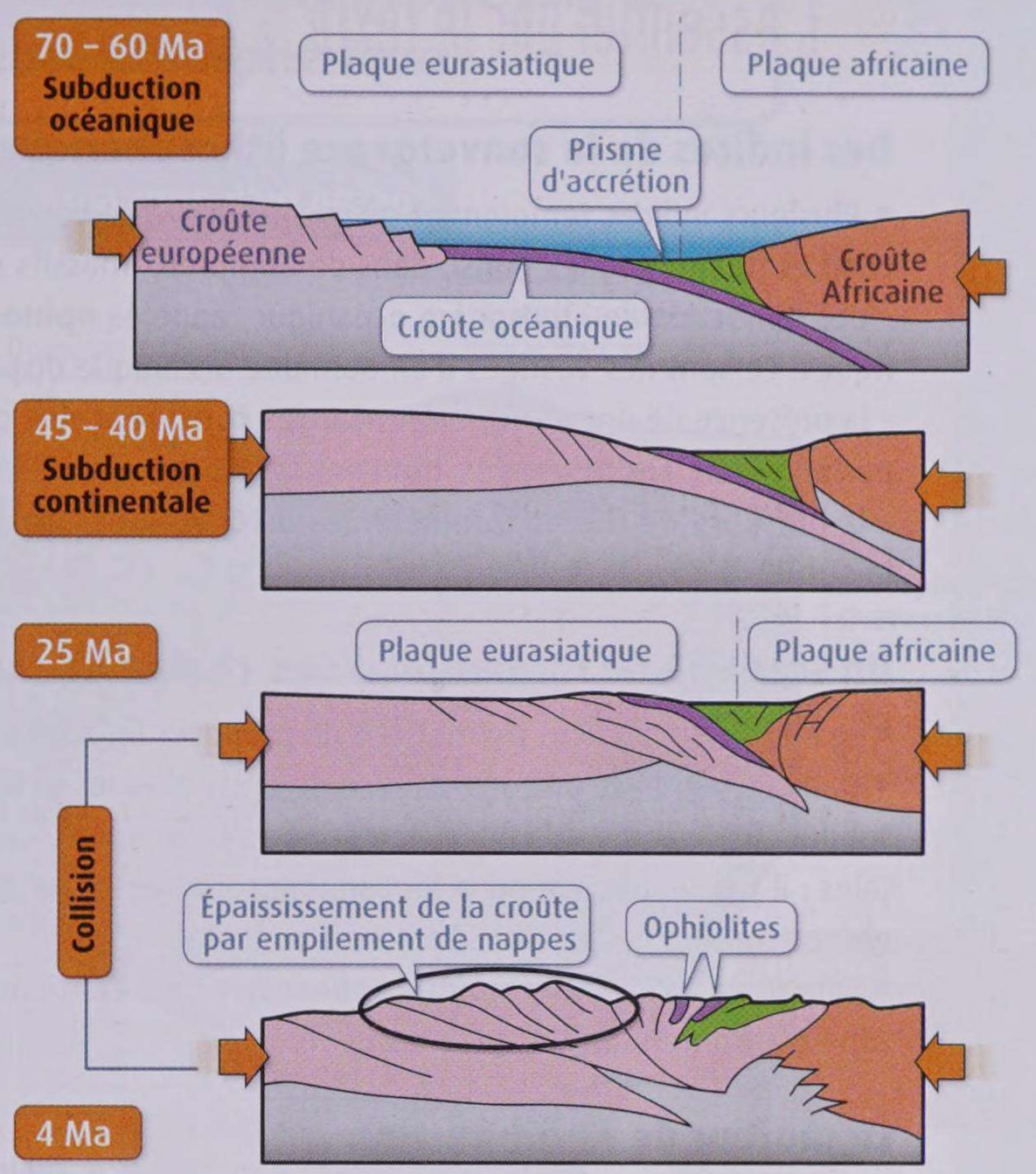
UNITÉ 3 Des transformations minéralogiques de roches océaniques et continentales

• Dans une roche, les associations de minéraux sont stables dans un domaine précis de pression (P) et de température (T), et donc de profondeur. Lorsque les conditions P/T changent, la roche subit des transformations minéralogiques.

• Dans les chaînes de montagnes, affleurent des roches océaniques et continentales dont les minéraux portent les traces de transformations minéralogiques à plus ou moins grande profondeur : ce sont des roches métamorphiques. Grâce aux diagrammes de stabilité des associations minéralogiques, il est possible de retrouver quelles conditions de pression et de température ont subies ces roches. Ces conditions correspondent à celles que rencontrent des matériaux océaniques ou continentaux lors d'un enfouissement lié à un processus de subduction. Ce processus est donc à l'œuvre lors de la formation d'une chaîne de montagnes.

UNITÉ 4 Un scénario de formation d'une chaîne de montagnes

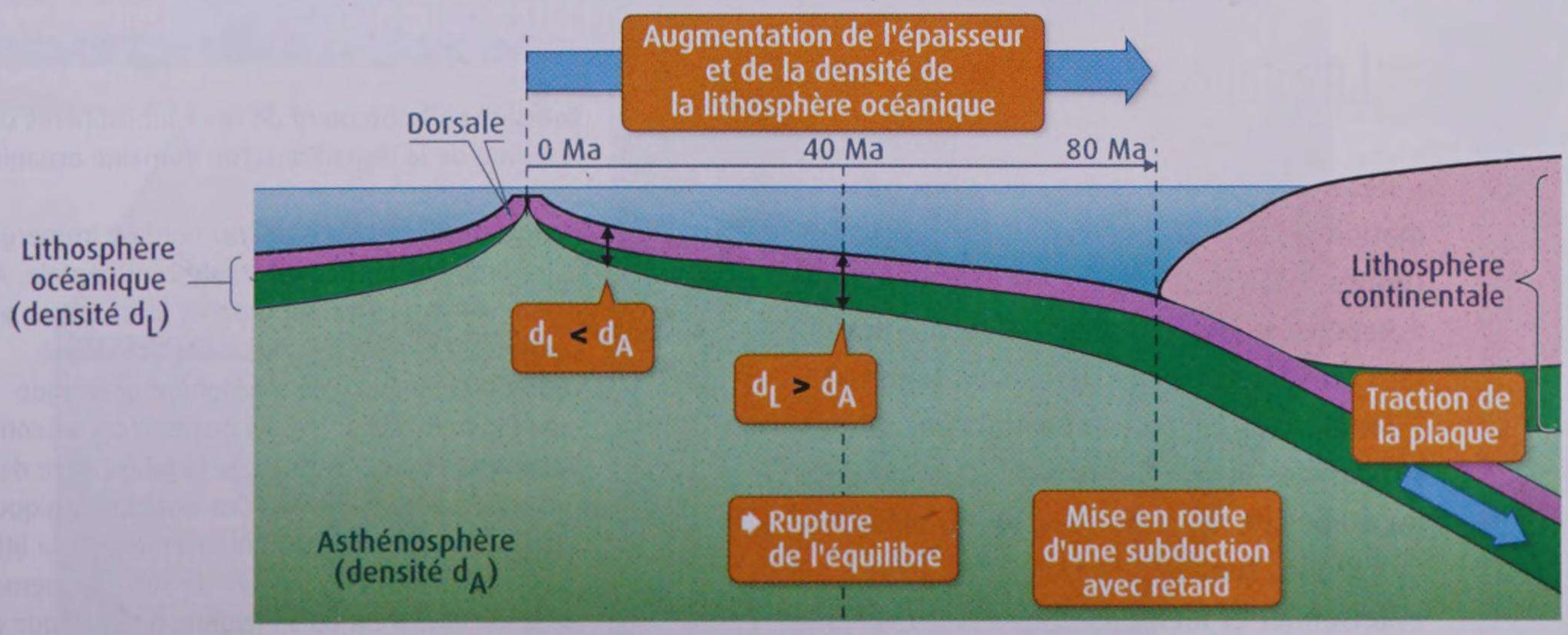
- Les données géophysiques complètent les données structurales et pétrographiques, permettant d'élaborer un scénario de formation d'une chaîne de montagnes.
- Dans un contexte de convergence lithosphérique, la subduction d'une lithosphère océanique conduit à la suture de deux lithosphères continentales : il y a subduction d'une des deux lithosphères continentales et collision entre les deux plaques lithosphériques qui étaient auparavant séparées par un océan.
- Lors de la collision, la croûte continentale s'épaissit par empilement de nappes de charriage au niveau de la zone d'affrontement des plaques.



Un scénario de formation de la chaîne des Alpes.

UNITÉ 5 Le moteur de la subduction

- Au fur et à mesure qu'elle s'éloigne de la dorsale, la lithosphère océanique s'épaissit, en raison de l'augmentation de la profondeur de l'isotherme 1 300 °C (limite lithosphère-asthénosphère). La densité de la lithosphère océanique augmente donc avec son âge par ajout de manteau lithosphérique plus dense (d = 3,3) que la croûte océanique (d = 2,9). La densité de la lithosphère océanique s'approche ainsi de celle du manteau lithosphérique. Il en résulte un enfoncement de la lithosphère océanique : on parle de subsidence thermique.
- La densité du manteau lithosphérique étant supérieure à celle de l'asthénosphère (d = 3,25), la densité de la lithosphère océanique finit par excéder celle de l'asthénosphère. L'équilibre isostatique est rompu et, avec un certain retard, la lithosphère entre en subduction. Elle tracte alors le reste de la plaque.



Évolution de la lithosphère océanique au cours de son vieillissement.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2 La formation des chaînes de montagnes

L'essentiel par le texte

Des indices de la convergence lithosphérique

• Plusieurs indices témoignent qu'un processus de convergence de plaques lithosphériques est à l'origine des chaînes de montagnes. Ainsi, dans de nombreux massifs montagneux, on observe :
– des lambeaux de lithosphère océanique, appelés **ophiolites**, situés à la suture entre deux plaques lithosphériques. Ce sont des vestiges d'un domaine océanique disparu ;
– la présence de deux anciennes **marges continentales passives** plus ou moins déformées. Autrefois séparées par un océan, ces marges se trouvent rapprochées au sein d'un même massif montagneux ;
– la présence de roches continentales ou océaniques dont les minéraux présentent des transformations liées à la **subduction**.

Un scénario de formation d'une chaîne de montagnes

• Les différents indices permettent de proposer un scénario de formation d'une chaîne de montagnes.
• Dans un contexte de convergence de deux plaques lithosphériques, la formation de la chaîne débute par une subduction océanique. Celle-ci entraîne la fermeture d'un océan, puis la suture de deux lithosphères continentales : il y a subduction de la lithosphère continentale d'une des deux plaques et **collision** entre les deux lithosphères continentales jadis séparées par l'océan.
• Lors de la collision, la croûte continentale s'épaissit par empilement de nappes de charriage au niveau de la zone d'affrontement des plaques.

Le moteur de la subduction

• Au fur et à mesure que la lithosphère océanique vieillit et s'éloigne de la dorsale, elle s'épaissit par ajout d'une semelle de manteau lithosphérique (l'isotherme 1 300 °C marquant sa limite inférieure est de plus en plus profond). Cet épaississement entraîne l'augmentation de la densité et donc de la profondeur de la lithosphère océanique : on parle de **subsidence thermique**.
• À partir d'un certain âge, la densité de la lithosphère océanique devient supérieure à celle de l'asthénosphère. L'équilibre isostatique est rompu et, avec un certain retard, la lithosphère océanique plonge dans l'asthénosphère : c'est la subduction.
• La lithosphère océanique plongeante tracte le reste de la plaque lithosphérique. La subduction a ainsi un rôle moteur dans la tectonique des plaques.

Les capacités et attitudes

▸ Recenser, extraire et organiser des informations à partir d'observations sur le terrain **(unités 1 et 2)**
▸ Repérer et identifier dans les roches des minéraux témoignant d'une subduction **(unité 3)**
▸ Mettre en relation les résultats des études structurales et minéralogiques pour identifier les étapes de la formation d'une chaîne de montagnes **(unité 4)**
▸ Raisonner et identifier, grâce à des calculs simples, le moteur de la subduction **(unité 5)**

Mots clés

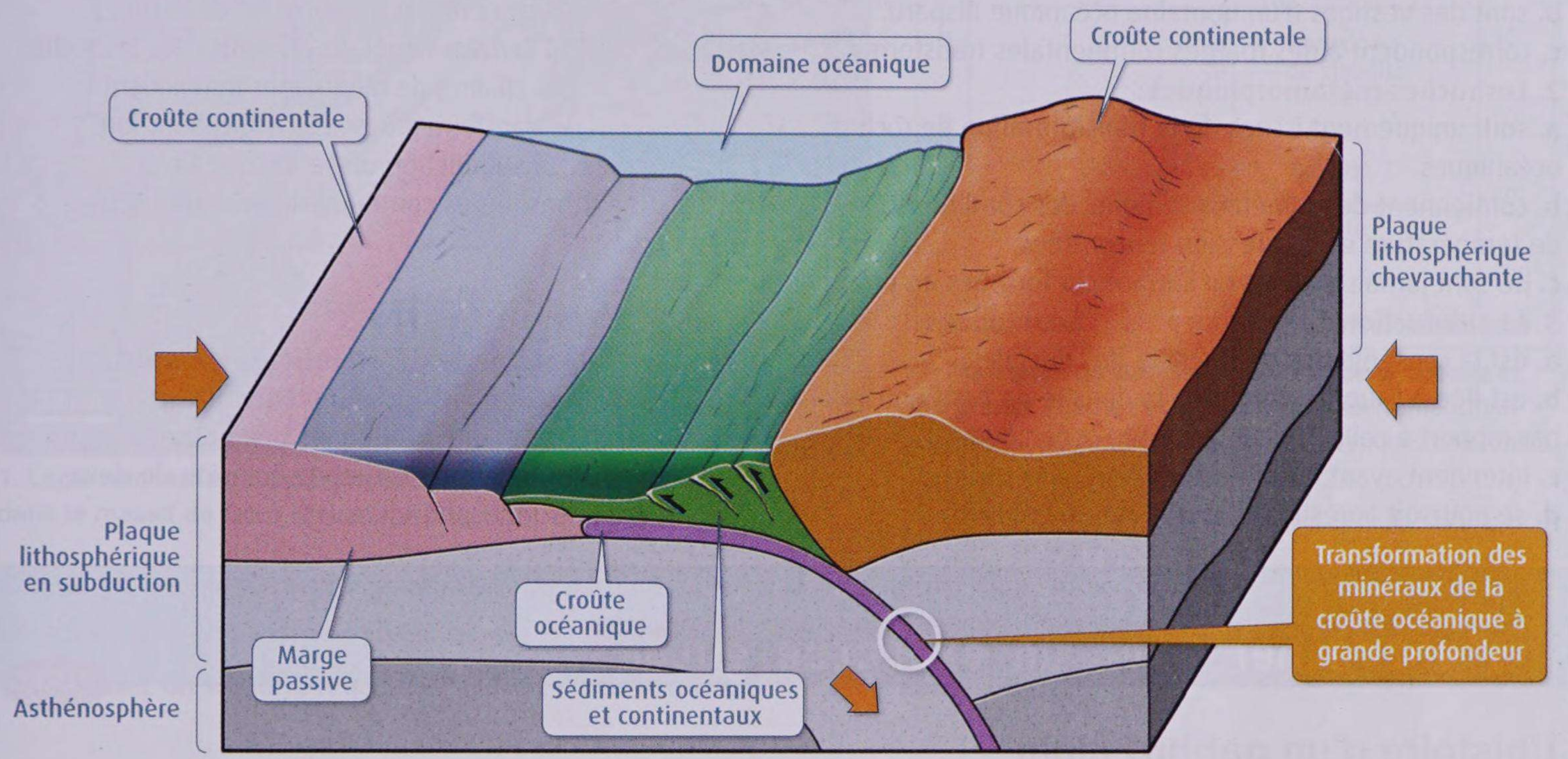
Voir aussi Dico des SVT p. 370

Collision : affrontement de deux lithosphères continentales résultant de la disparition d'un domaine océanique par subduction.
Marge continentale passive : bordure immergée d'un continent formée de croûte continentale. Au niveau d'une marge passive, on observe la transition entre cette croûte continentale et une croûte océanique.
Ophiolite : lambeau de lithosphère océanique qui s'est trouvé charrié puis dispersé sur un continent.
Subduction : enfoncement de la lithosphère dans l'asthénosphère au niveau des fosses océaniques.
Subsidence thermique : enfoncement de la lithosphère océanique au fur et à mesure de son éloignement de la dorsale. Il est dû à l'évolution thermique de la lithosphère océanique.

L'essentiel par l'image

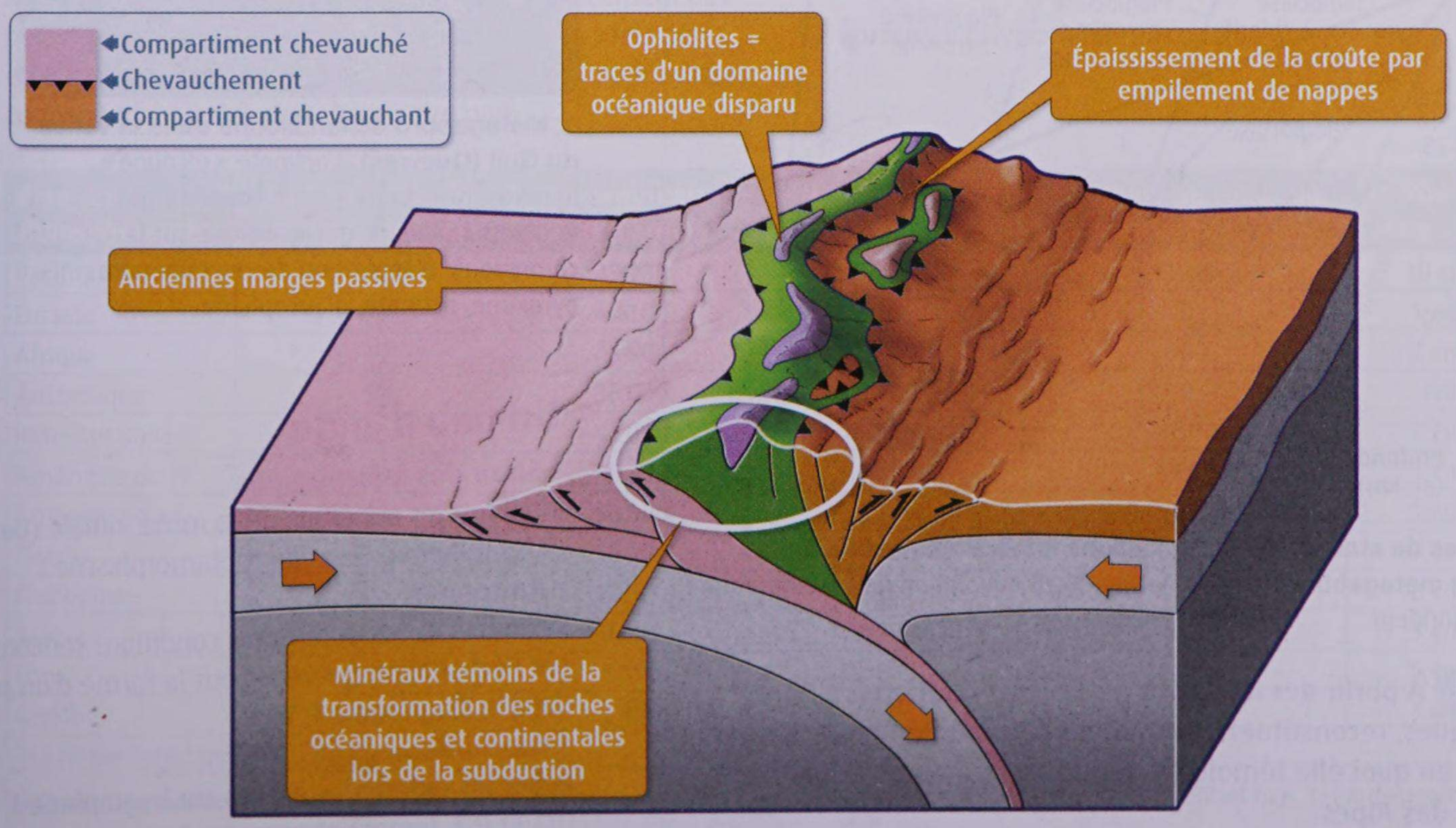
Le contexte de formation des chaînes de montagnes : la convergence lithosphérique

❶ Subduction : disparition d'un océan



Moteur de la subduction = différence de densité entre la lithosphère océanique âgée et l'asthénosphère

❷ Subduction de la lithosphère continentale et collision



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Les ophiolites :

a. sont constituées uniquement de roches sédimentaires.

b. sont des vestiges d'un domaine océanique disparu.

c. correspondent à des marges continentales transformées.

2. Les roches métamorphiques :

a. sont uniquement issues de la transformation de roches océaniques.

b. contiennent des minéraux témoins des conditions de température et de pression rencontrées.

c. ne sont jamais visibles en surface car formées en profondeur.

3. La subduction de la lithosphère océanique :

a. est la conséquence de l'activité des dorsales.

b. est liée à l'augmentation de la densité de l'asthénosphère par rapport à celle de la lithosphère océanique.

c. intervient avant la collision.

d. se poursuit après la collision.

2 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Lors d'une collision, les marges continentales ne sont pas déformées.

b. Certains minéraux présents dans les roches des chaînes de montagnes témoignent de transformations liées à la subduction.

c. La subduction cesse lorsque deux lithosphères continentales s'affrontent.

3 Argumentez

Rédigez un texte argumenté permettant de justifier l'affirmation suivante :

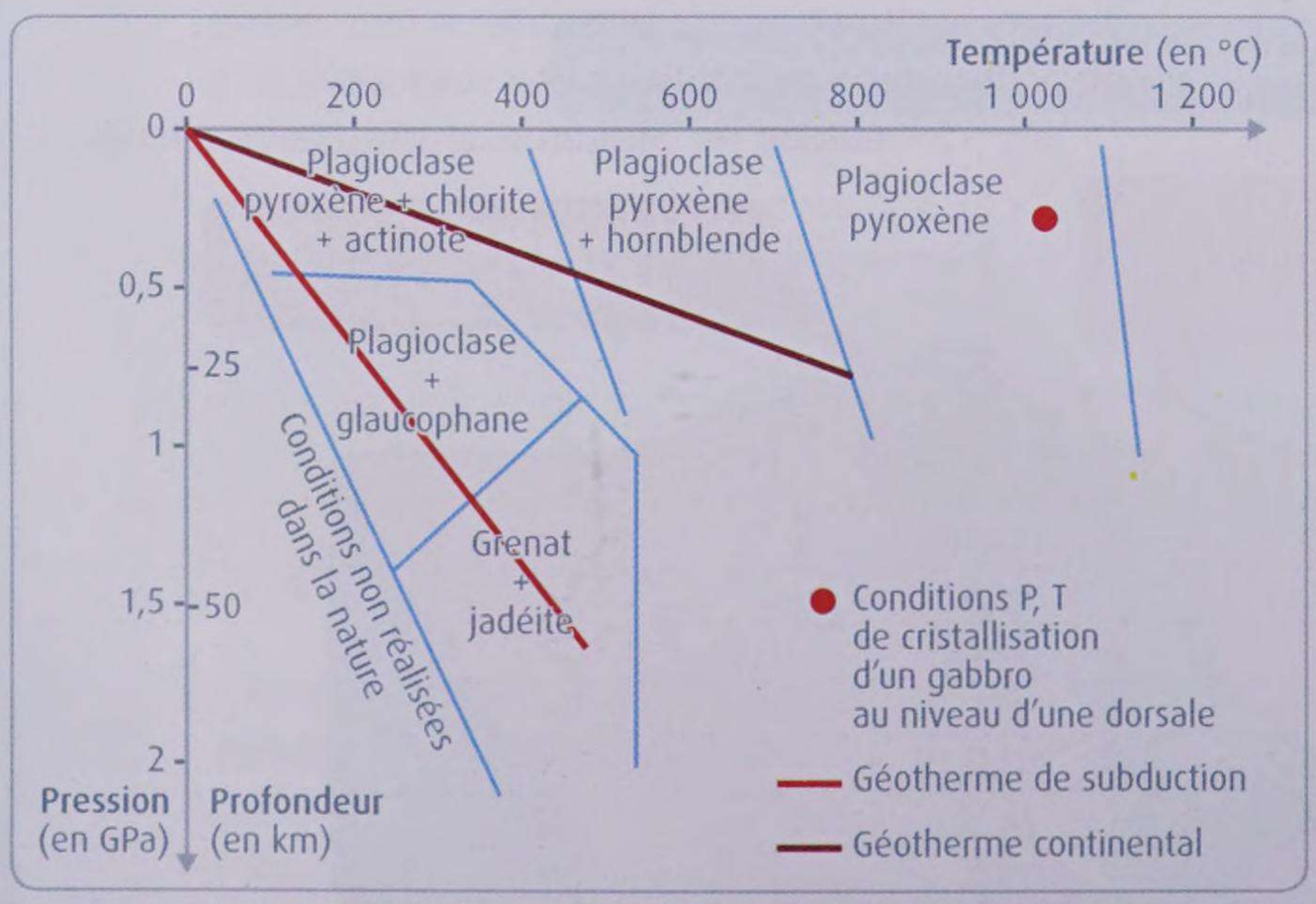
Les chaînes de montagnes présentent divers indices de subduction et de collision de deux plaques lithosphériques.

s'entraîner avec un exercice guidé

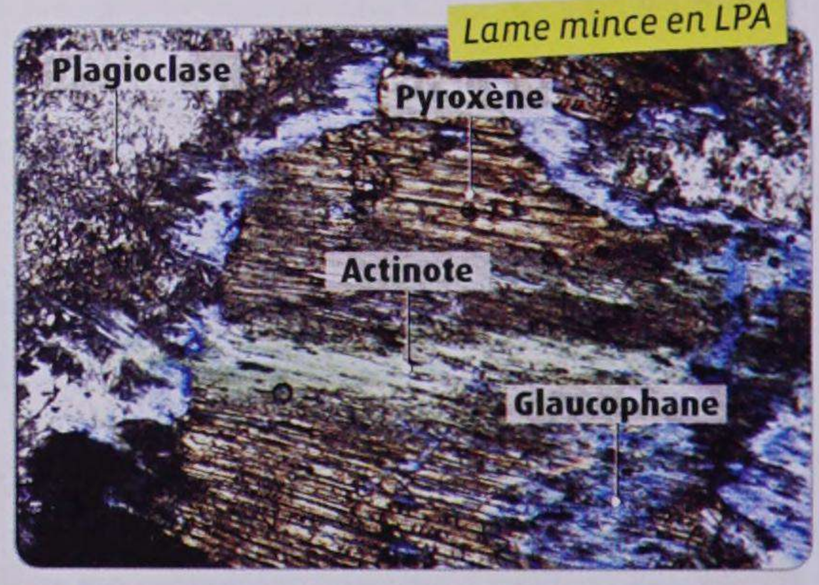
PISTE

4 L'histoire d'un gabbro alpin

Les gabbros sont des roches magmatiques de structure grenue, constituées essentiellement de plagioclase et de pyroxène. Au cours de leur histoire, les gabbros de la croûte océanique se transforment en roches métamorphiques : les métagabbros.



2. Domaines de stabilité des associations minéralogiques dans les gabbros et métagabbros. Le géotherme décrit l'évolution de la température avec la profondeur.



1. Métagabbro échantillonné dans la vallée du Guil (Queyras). L'actinote « recoupe » le pyroxène, et elle « est recoupée » par le glaucophane, ce qui renseigne sur la chronologie d'apparition de ces minéraux : pyroxène, actinote, glaucophane.

QUESTION À partir des minéraux et de leurs relations géométriques, reconstituez l'histoire de l'échantillon présenté puis expliquez en quoi elle témoigne de processus à l'œuvre lors de la formation des Alpes.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

Identifiez les minéraux de la roche initiale (gabbro) et les minéraux issus du métamorphisme.

• Raisonner

Reconstituez les différentes conditions rencontrées par l'échantillon (placées sous la forme d'un point dans le diagramme P, T).

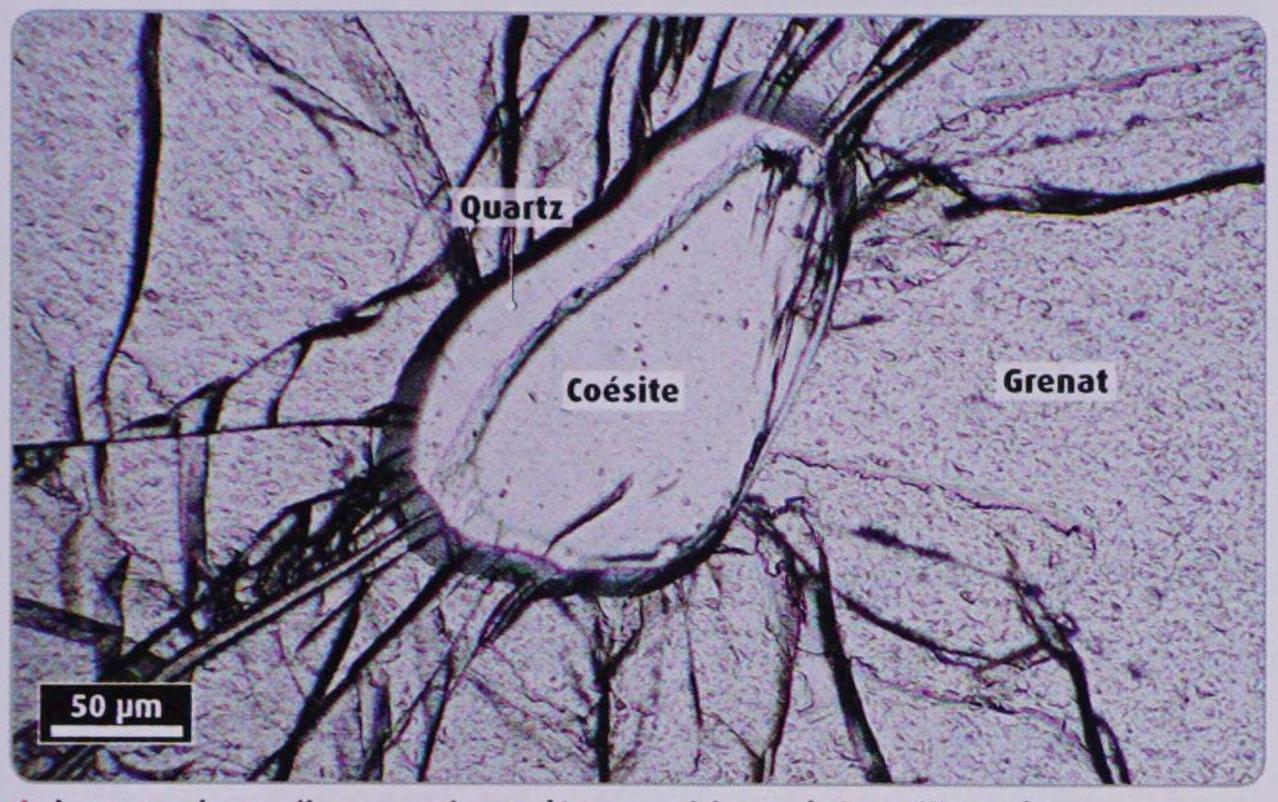
• Conclure

Reliez les différentes étapes sur le graphique (trajet P, T, temps) et nommez-les.

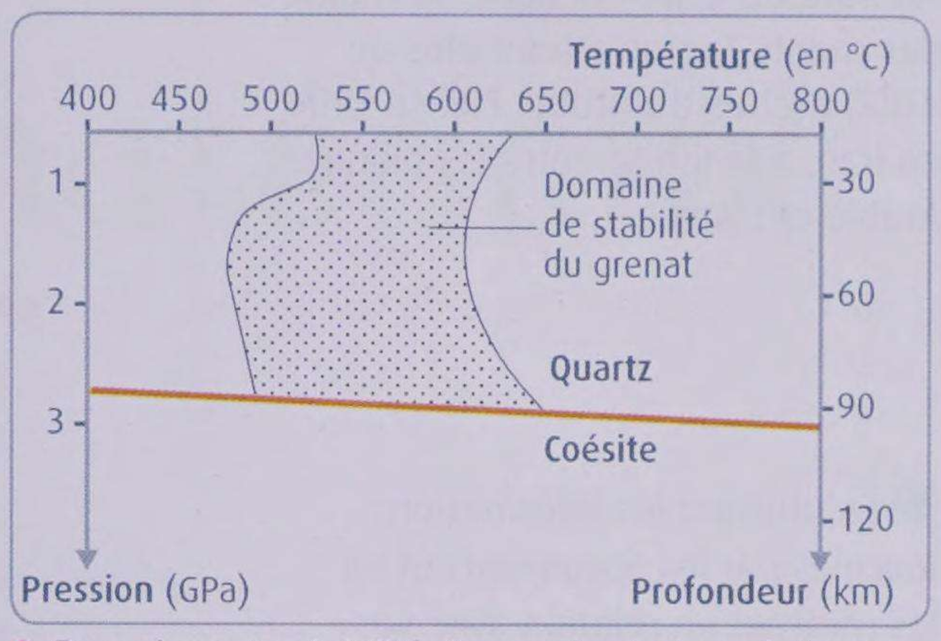
5 Des indices minéralogiques de l'histoire de la croûte continentale

PISTE — Raisonner

Dans le massif alpin de Dora Maira, on a échantillonné des roches métamorphiques contenant un minéral particulier en inclusion dans des grenats : la coésite. L'analyse de ces roches montre qu'elles dérivent de roches sédimentaires continentales.



1. Lame mince d'une roche métamorphique échantillonnée dans le massif de Dora Maira.



2. Domaines de stabilité du quartz, de la coésite et du grenat. Coésite et quartz ont la même composition chimique (SiO_2) mais des propriétés physiques différentes. Le quartz a une masse volumique de 2,65 $g.cm^{-3}$, la coésite a une masse volumique de 3,01 $g.cm^{-3}$.

1. Estimez les conditions qui ont permis l'apparition de coésite et de grenat dans ces roches.
2. Proposez des arguments justifiant que la roche initiale est une roche de la croûte continentale.
3. Proposez un scénario retraçant l'histoire de cette roche de la croûte continentale.

6 Subduction et vitesse des plaques lithosphériques

Calculer et raisonner

Deux causes sont envisagées pour expliquer le déplacement des plaques lithosphériques : soit elles sont tractées au niveau des zones de subduction, soit elles sont poussées à la dorsale. Des données géophysiques permettent de poser l'hypothèse d'un rôle largement prédominant des zones de subduction. Pour éprouver cette hypothèse, on cherche s'il existe une relation entre la vitesse de déplacement des plaques lithosphériques et la proportion de leurs frontières en subduction d'une part, et la proportion de leurs frontières correspondant à des dorsales d'autre part.

1. Indiquez une conséquence vérifiable de l'hypothèse formulée.
2. Construisez deux graphiques présentant, pour chaque plaque, la vitesse de déplacement en fonction soit du pourcentage de frontières en subduction, soit du pourcentage de frontières constituées de dorsales.
3. Éprouvez l'hypothèse et concluez.

Plaques lithosphériques	Surface totale (en millions de km²)	Circonférence (en km)	Longueur de dorsales (en km)	Longueur de zones de subduction (en km)	Vitesse de déplacement
Pacifique	108	49 900	11 900	11 300	10 $cm.an^{-1}$
Eurasie	69	42 100	3 500	0	1 $cm.an^{-1}$
Afrique	79	41 800	5 800	900	2 $cm.an^{-1}$
Antarctique	59	35 600	1 700	0	Nulle *
Inde-Australie	60	42 000	10 800	8 300	7 $cm.an^{-1}$
Amérique du N	60	38 800	8 600	1 000	1 $cm.an^{-1}$
Amérique du S	41	30 500	7 100	300	1 $cm.an^{-1}$
Nazca	15	18 700	5 400	5 200	7 $cm.an^{-1}$
Philippine	5,4	10 300	0	4 100	8 $cm.an^{-1}$
Arabie	4,9	9 800	2 700	0	3 $cm.an^{-1}$
Coco	2,9	8 800	2 900	2 500	5 $cm.an^{-1}$
Caraïbe	3,8	8 800	0	0	1 $cm.an^{-1}$

* La plaque Antarctique tourne sur elle même.

1. Quelques caractéristiques des plaques lithosphériques. Les vitesses sont indiquées dans un référentiel fixe, celui des points chauds.

Appliquer ses connaissances

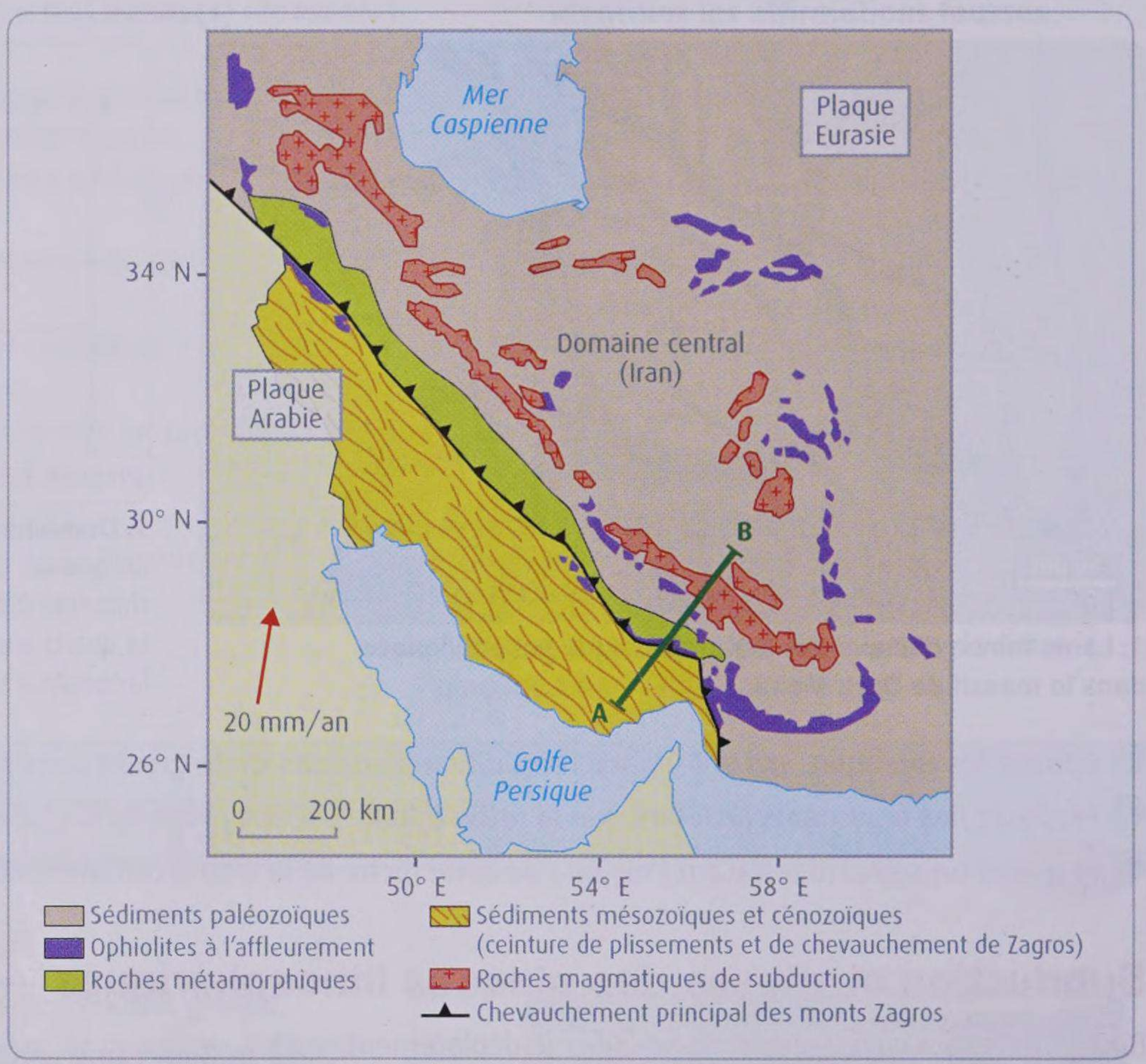
7 La chaîne des monts Zagros en Iran

Mettre en relation des informations pour construire un raisonnement

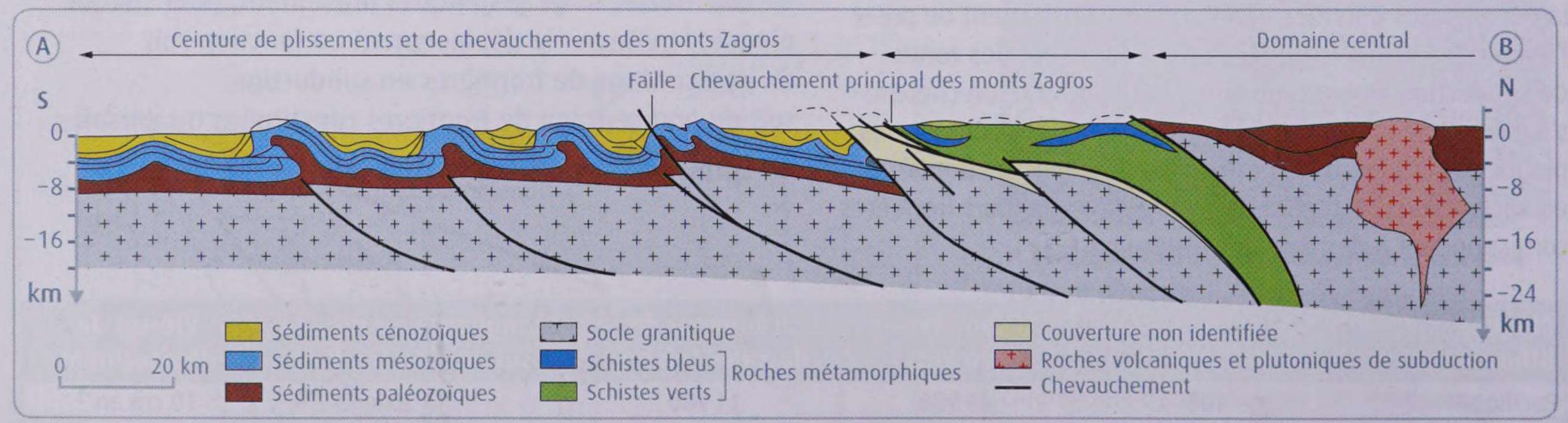
Au nord du golfe Persique, la chaîne des monts Zagros atteint plus de 4 000 mètres d'altitude. Elle se situe, en Iran, à la limite entre les plaques Arabie et Eurasie.

En utilisant les informations fournies par les documents et en les mettant en relation avec vos connaissances, proposez un scénario de formation de la chaîne des monts Zagros en Iran.

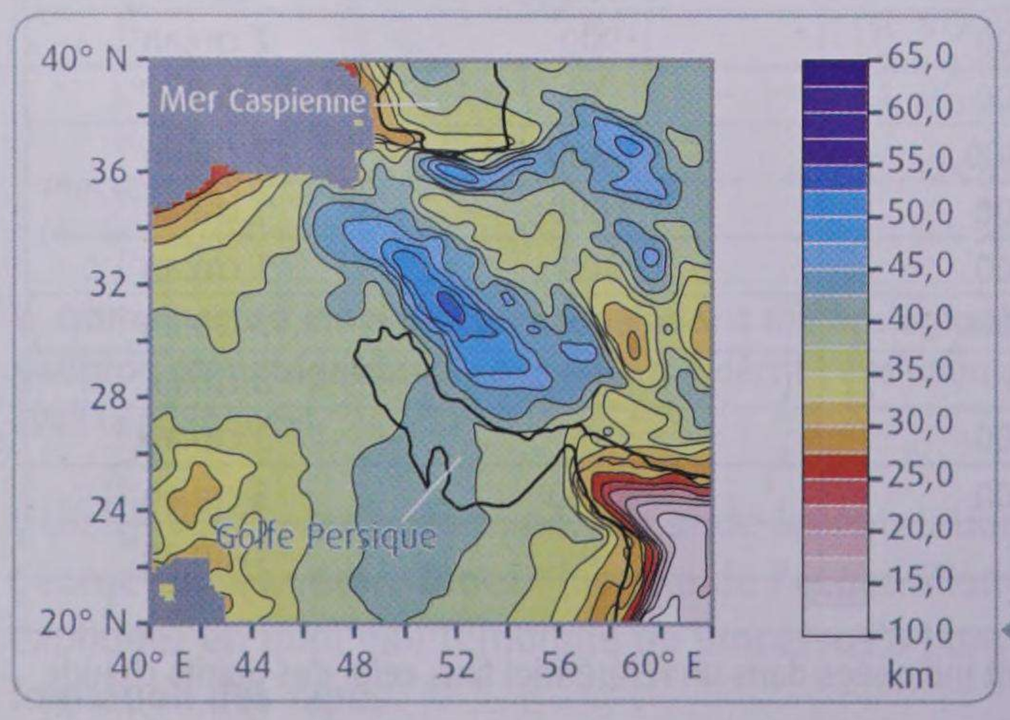
Pour cela vous pouvez :
- relever des indices d'épaississement dans la région de la chaîne des Zagros et argumenter l'existence d'une racine crustale.
- expliquer la présence d'ophiolites au cœur de la chaîne des Zagros.
- montrer que le phénomène de subduction est impliqué dans la formation de la chaîne des Zagros.



1. Carte géologique simplifiée de la région des monts Zagros.



2. Coupe géologique transversale de la chaîne des monts Zagros selon A–B.

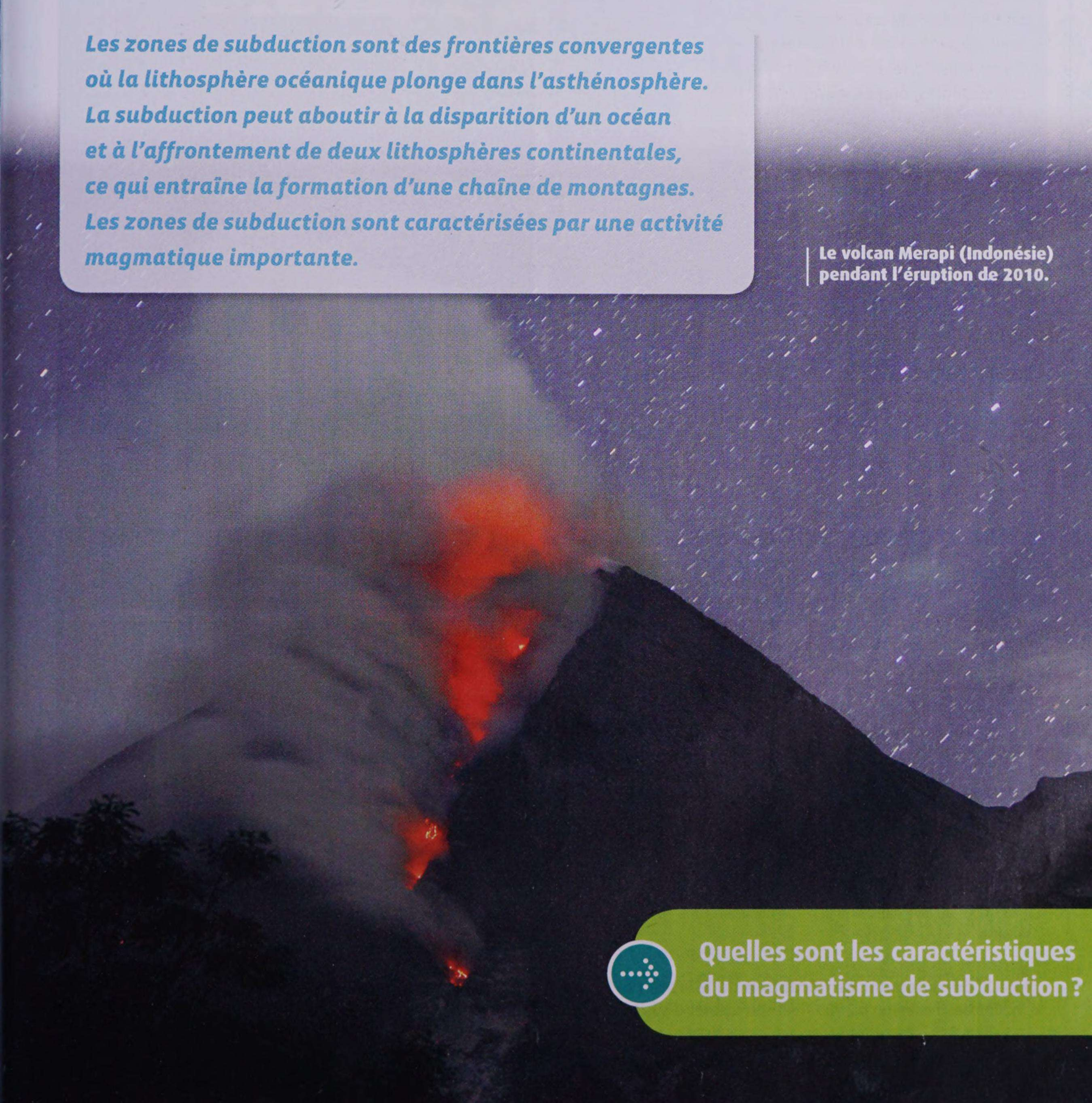


3. Carte de la profondeur du Moho dans le golfe persique et la région d'Iran.

CHAPITRE 3

La production de nouveaux matériaux continentaux

Les zones de subduction sont des frontières convergentes où la lithosphère océanique plonge dans l'asthénosphère. La subduction peut aboutir à la disparition d'un océan et à l'affrontement de deux lithosphères continentales, ce qui entraîne la formation d'une chaîne de montagnes. Les zones de subduction sont caractérisées par une activité magmatique importante.



Le volcan Merapi (Indonésie) pendant l'éruption de 2010.

Quelles sont les caractéristiques du magmatisme de subduction ?

UNITÉ 1

Le volcanisme des zones de subduction

L'activité magmatique des zones de subduction s'exprime en surface par un volcanisme important. Ce volcanisme diffère de celui des dorsales océaniques et des points chauds.

Quelles sont les caractéristiques du volcanisme de subduction ?

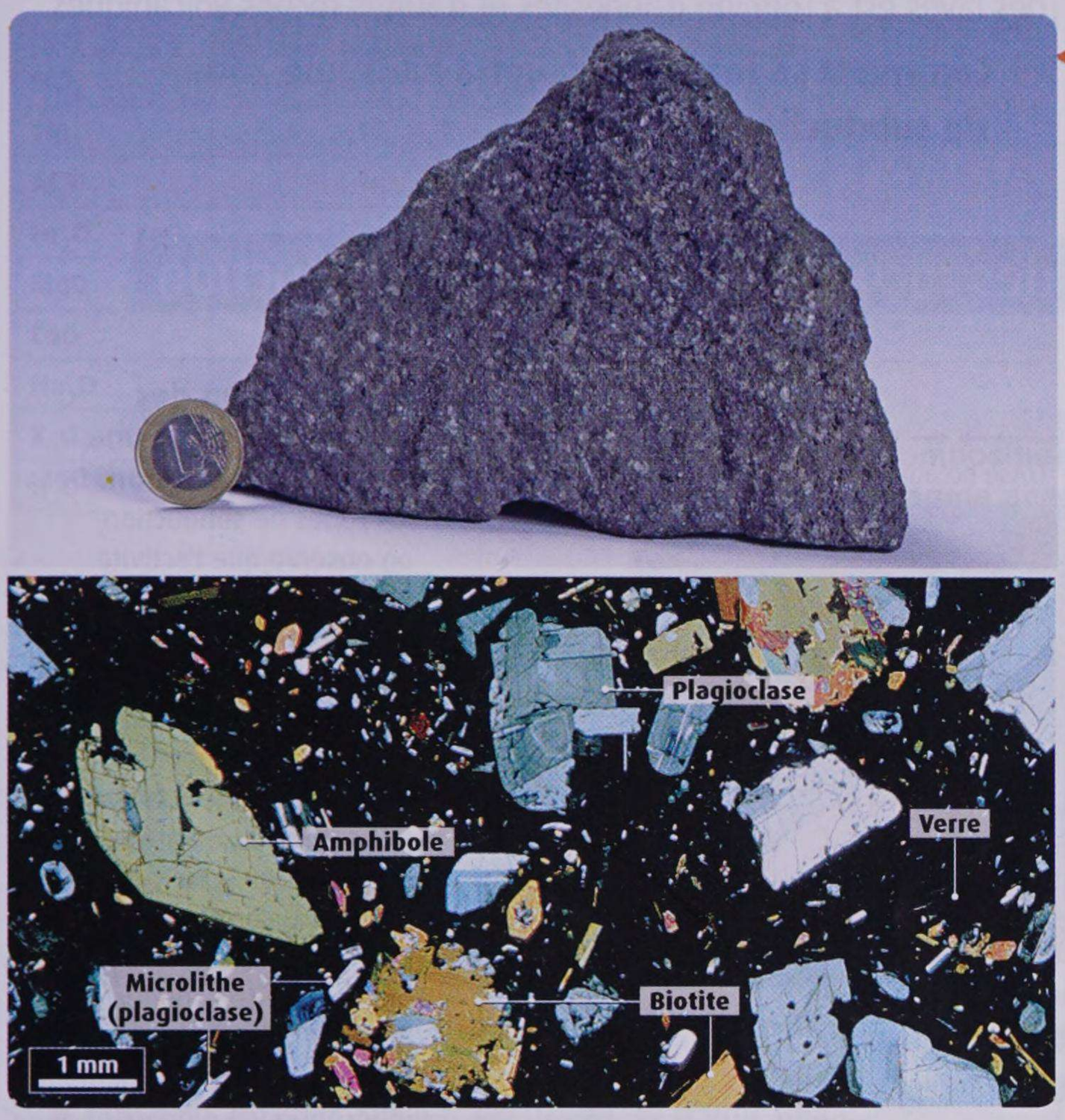
Un exemple d'éruption volcanique en zone de subduction

- **5 octobre.** Des séismes annoncent la montée d'un grand volume de magma.
- **27 – 29 octobre.** Le cratère laisse échapper de la lave incandescente visqueuse. Des coulées pyroclastiques (mélange de laves, de cendres, de blocs et de débris à haute température) dévalent les pentes depuis le dôme de lave du sommet.
- **30 octobre – 4 novembre.** L'activité s'intensifie. Des détonations sont entendues jusqu'à 12 km. Les explosions sont accompagnées de nuées ardentes (nuages de gaz brûlants à très forte pression transportant une grande quantité de débris et de lave de toute taille). Un panache éruptif (cendres et gaz) atteint 3,5 km d'altitude au-dessus du cratère (photo 2 ci-contre). Un total de 50 millions de m^3 de matériaux éruptifs est émis entre le 27 octobre et le 4 novembre.
- **5 novembre.** Une éruption paroxysmale (d'intensité maximale) se déclenche. Une coulée pyroclastique parcourt plus de 15 km à partir du cratère et tue près de 200 personnes.

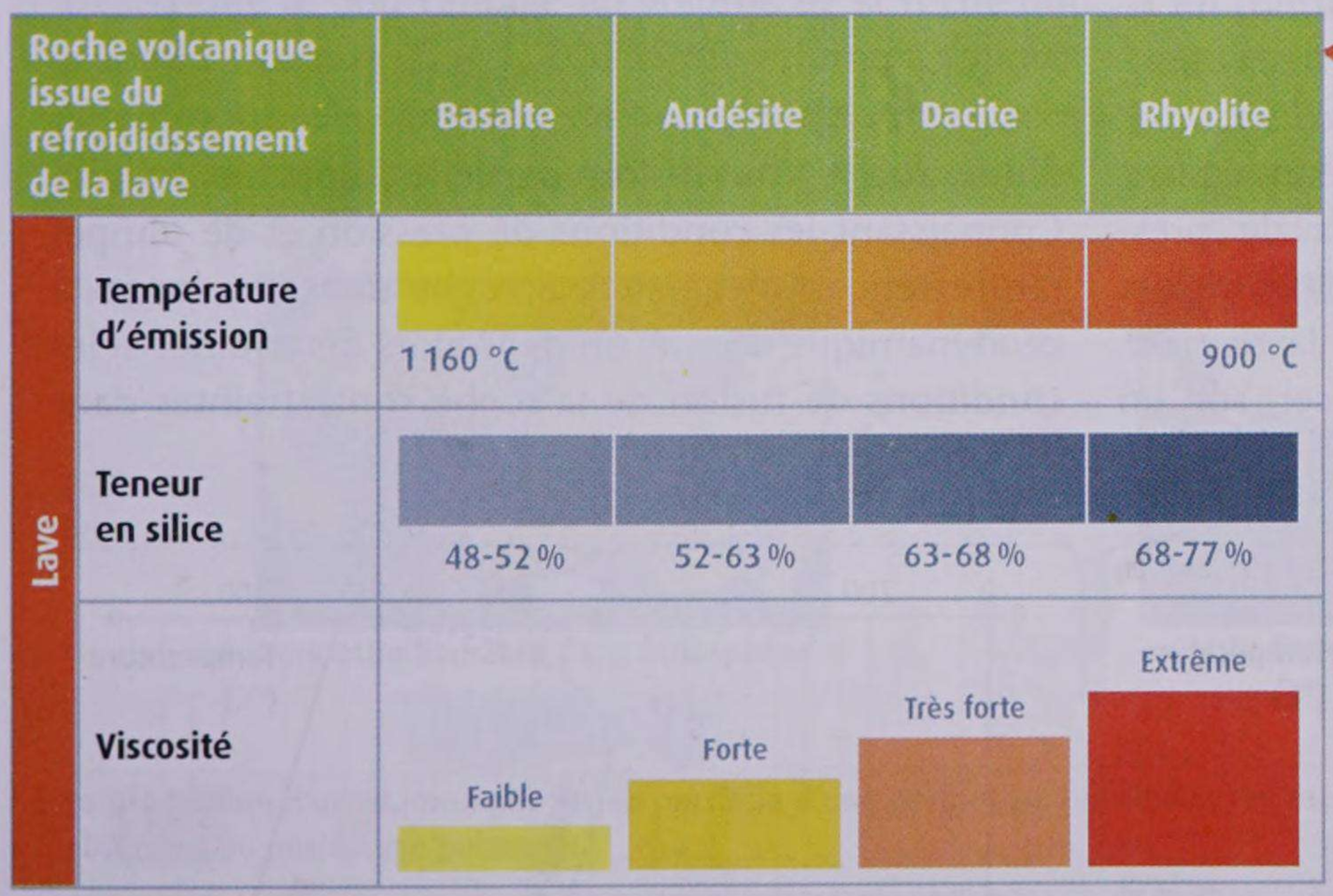
Le Merapi sort transformé de l'éruption. L'empilement de dômes de laves formé depuis 1931 fait place à un cratère de 500 m de diamètre et 200 m de profondeur (photo 3 ci-contre). L'activité du volcan s'accompagne d'émissions de lave dans ce cratère. Un nouveau dôme de lave visqueuse se forme.

1 Le déroulement de l'éruption du Merapi (île de Java, Indonésie) en 2010. Le Merapi est le volcan le plus actif d'Indonésie. Il culmine à 2 900 m et son diamètre à la base est de 10 km.

Les produits émis par le volcanisme de subduction



2 Échantillon et lame mince d'andésite. (en LPA). Les roches volcaniques des zones de subduction sont très variées. La plus fréquente est l'andésite. Elle est constituée de microcristaux (notamment des microcristaux allongés de plagioclase : les microlithes) et de verre, qui témoignent du refroidissement rapide de la lave à partir de laquelle s'est formée la roche : sa structure est microlithique. L'andésite comprend aussi quelques cristaux visibles à l'œil nu, essentiellement des cristaux de plagioclase et éventuellement des cristaux d'amphibole. Cette dernière, ainsi que la biotite (également présente dans les andésites) sont des minéraux hydratés, reconnaissables à la présence de radicaux –OH dans leur formule chimique. Les autres roches volcaniques des zones de subduction (dacite, rhyolite, de même structure que l'andésite) comprennent également des minéraux hydratés.



3 Relations entre composition chimique, viscosité et température d'émission des laves. La viscosité des magmas (qui, lorsqu'ils parviennent en surface, forment des laves) varie, en fonction notamment de leur teneur en silice. Il en résulte des différences de vitesse de remontée vers la surface : plus le magma est visqueux, plus il remonte lentement, plus il se refroidit. Cet effet amplifie encore les différences de viscosité. Or plus un magma est visqueux, plus les gaz libérés par la décompression ont de mal à s'échapper. Au-delà d'une certaine accumulation, ils provoquent des explosions qui sont à l'origine de coulées pyroclastiques. Lors de son émission en surface, une lave andésitique est 10^6 fois plus visqueuse qu'une lave basaltique.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Montrez que le volcanisme de subduction est explosif et présentez les caractéristiques de la lave produite par le volcan Merapi.
2. **DOC. 2.** Réalisez un schéma de la lame mince d'andésite ; montrez que sa structure témoigne d'une mise en place en surface.
3. **DOC. 2 ET DOC. 5 P. 189.** Comparez la composition minéralogique d'un basalte et d'une andésite.
4. **DOC. 3.** Expliquez le caractère explosif du volcanisme de subduction.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques du volcanisme de subduction.

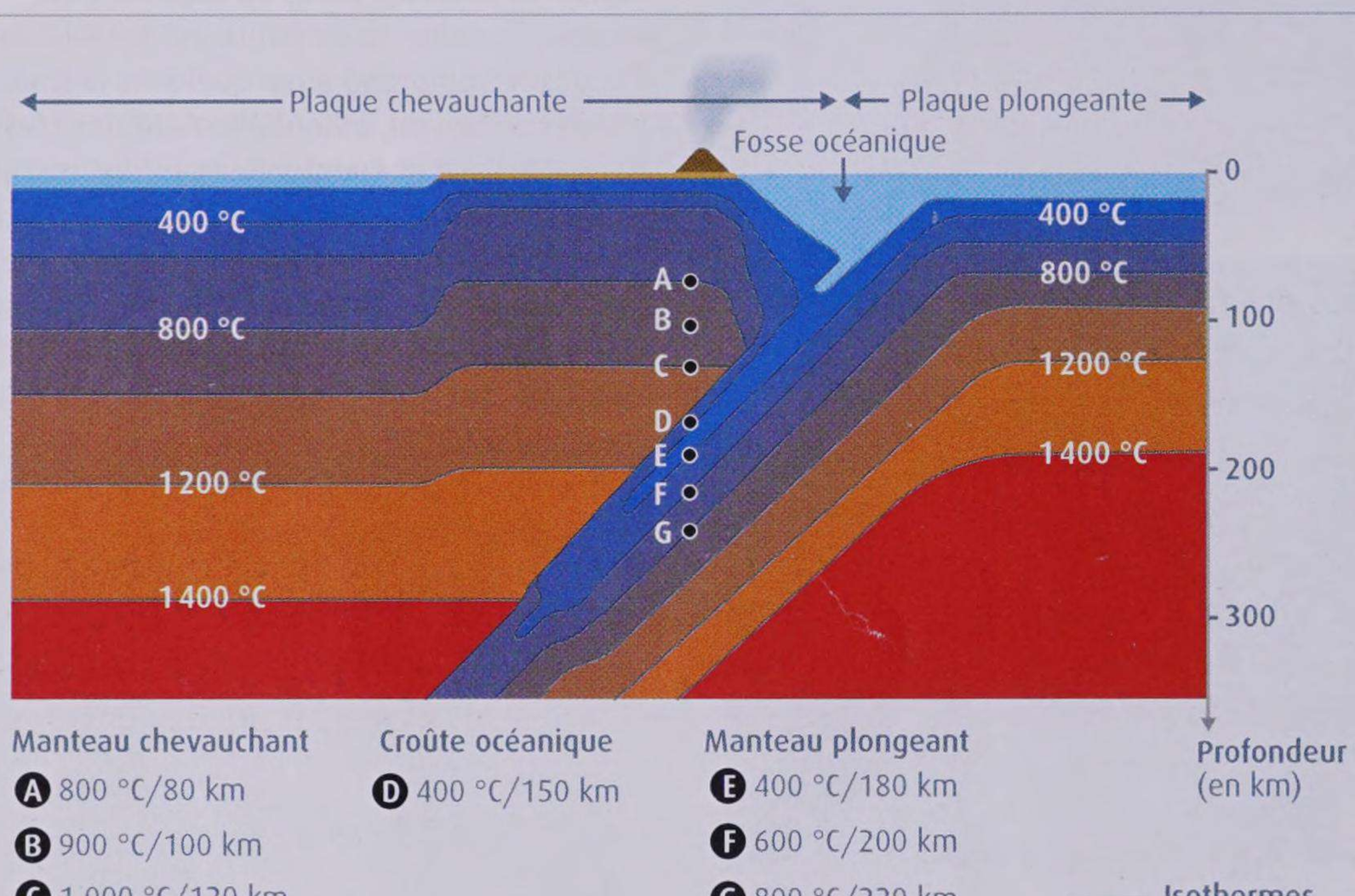
UNITÉ 2

L'origine du magma dans les zones de subduction

Les zones de subduction sont le siège d'une activité volcanique importante. Les éruptions sont explosives et le refroidissement des laves est à l'origine d'andésites et d'autres roches volcaniques.

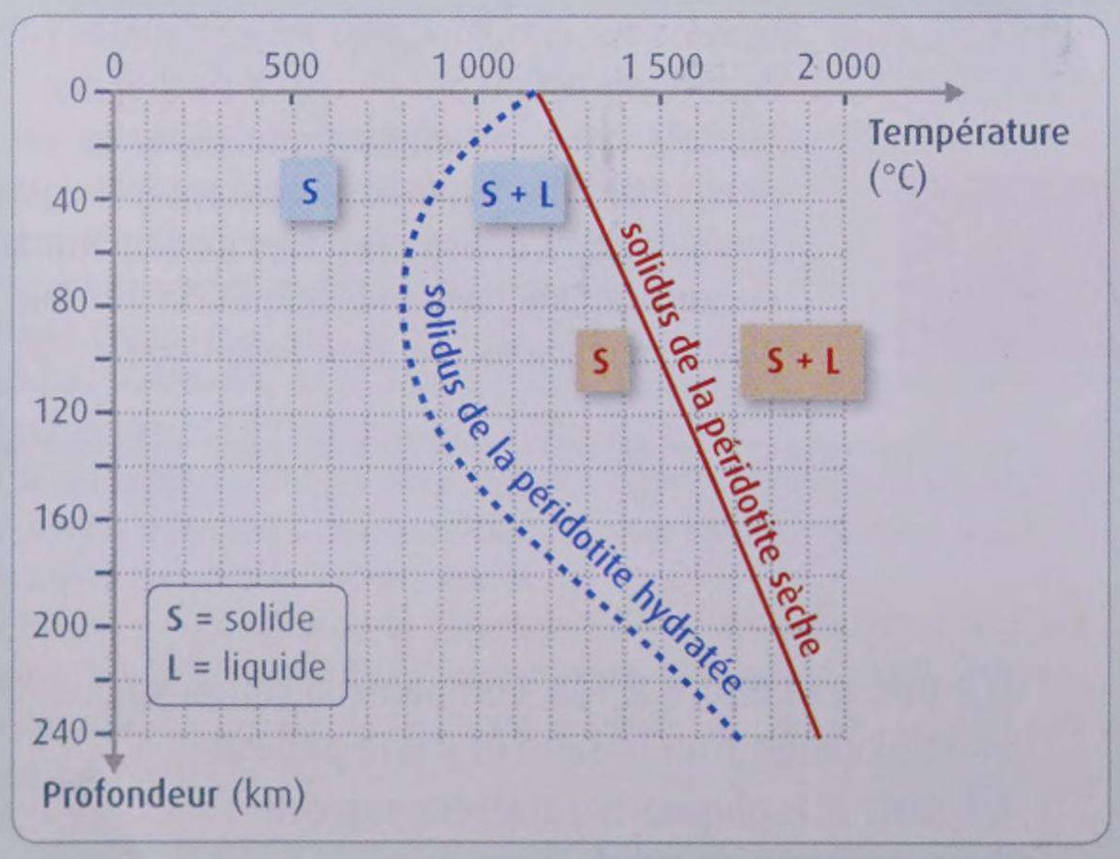
Comment se forme le magma dans une zone de subduction ?

Les conditions d'une fusion des roches en contexte de subduction

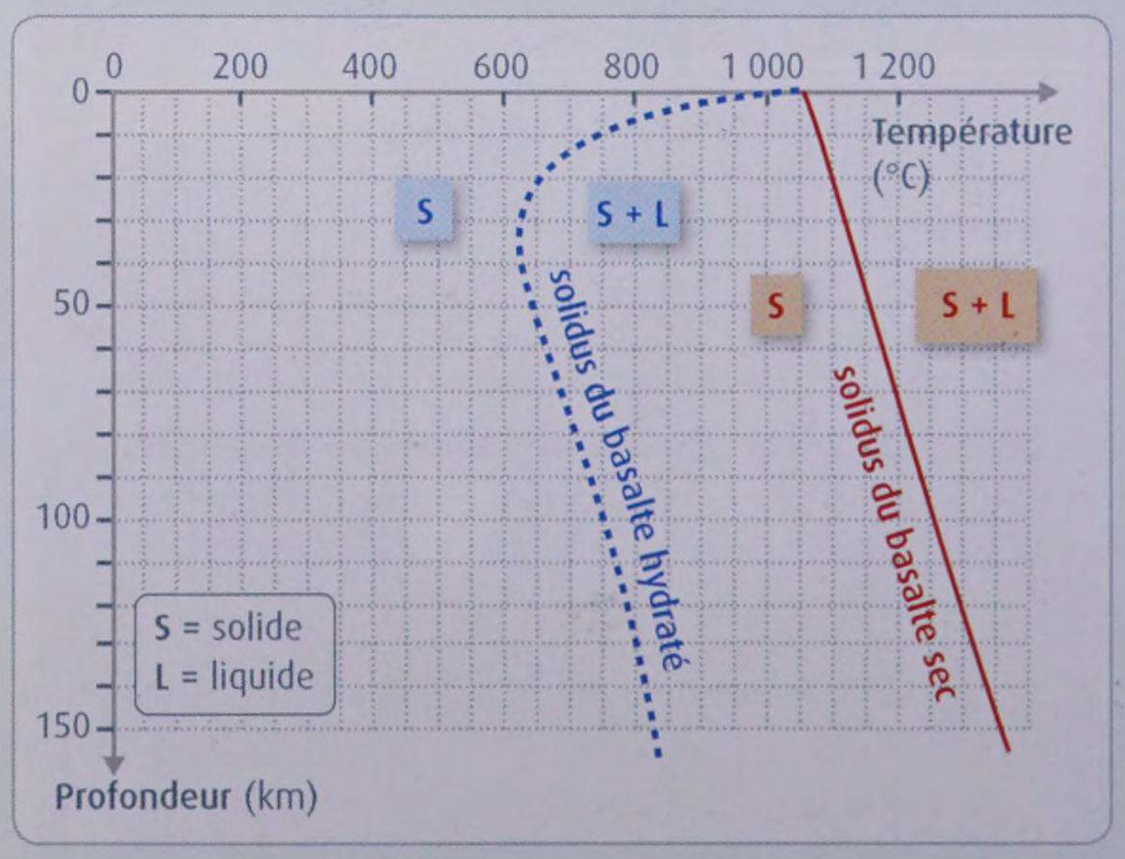


1 La répartition des isothermes dans une zone de subduction. Dans les zones de subduction, on observe que l'activité volcanique est localisée au niveau d'un arc volcanique à une centaine de km de distance de la fosse océanique. Les points A, B, C correspondent à des péridotites du manteau lithosphérique chevauchant. Le point D correspond à une roche de la croûte océanique plongeante (en subduction) et les points E, F, G correspondent à une péridotite du manteau lithosphérique plongeant.

Au laboratoire, il est possible de soumettre un échantillon de roche à différentes conditions de pression P (correspondant à différentes profondeurs) et de température T, et d'observer l'état de la matière. Les mesures réalisées permettent de tracer, sur un diagramme P/T, la courbe de fusion commençante d'une roche (ou fusion partielle), appelée solidus. Connaissant les conditions de pression et de température rencontrées par une roche dans un contexte géodynamique donné, on peut alors déterminer si les conditions de fusion de la roche sont atteintes dans ce contexte.



Conditions de fusion d'une péridotite sèche ou hydratée.



Conditions de fusion d'un basalte sec ou hydraté.

2 La recherche expérimentale des conditions de fusion au niveau d'une zone de subduction.

La formation d'un magma andésitique

	Péridotite hydratée	Magma andésitique
SiO_2	44,77	62,39
TiO_2	0,19	1,00
Al_2O_3	4,16	14,12
Fe_2O_3 + FeO	10,24	9,76
MgO	39,22	2,13
CaO	2,42	6,16
Na_2O	0,54	4,06
K_2O	0,06	0,44
H_2O	5,23	1,24

3 Composition chimique d'une péridotite hydratée et d'un magma andésitique (données en pourcentages massiques).

● Lorsque les conditions de fusion sont atteintes, la péridotite commence à fondre : certains éléments chimiques des minéraux passent préférentiellement dans la phase liquide (comme le potassium K) et d'autres restent dans les réseaux cristallins (comme le magnésium Mg). Cette fusion partielle produit un magma et une péridotite résiduelle. Ni l'un ni l'autre n'ont la même composition que la péridotite « mère ». Le magma, moins dense que la péridotite résiduelle, migre vers la surface.

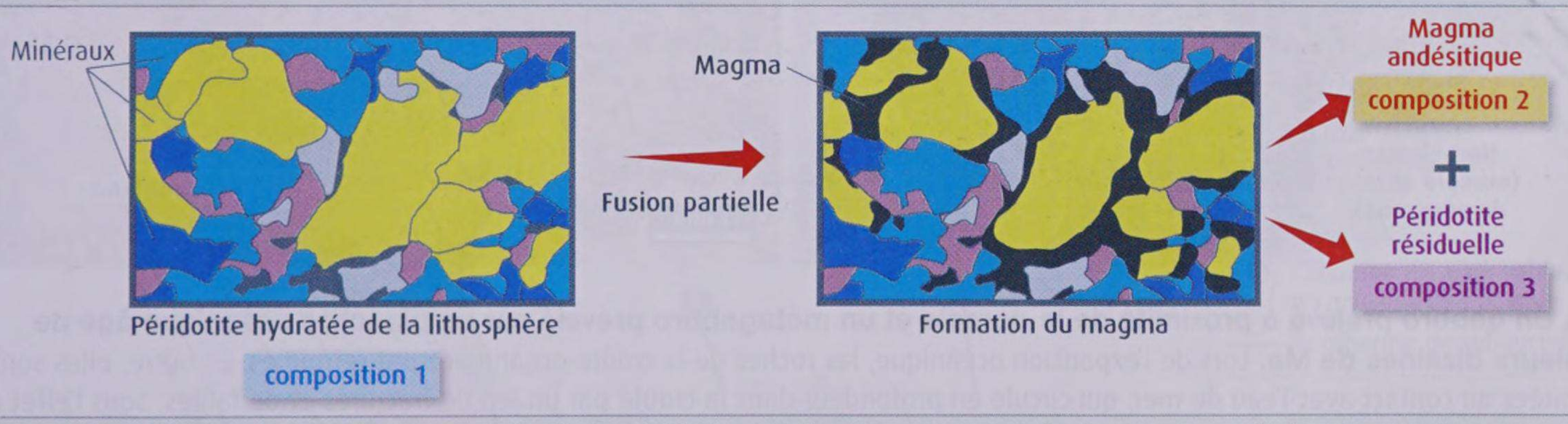
● On peut estimer le taux de fusion T_f d'une roche, c'est-à-dire le pourcentage du volume de la roche qui a fondu (lorsque $T_f = 1$, 100 % du volume a fondu). Il faut pour cela comparer les pourcentages massiques d'un élément chimique A dans la roche mère, dans la roche résiduelle et dans le magma. En effet, ces pourcentages sont liés par la relation :

$$A_{\text{roche mère}} = [A_{\text{magma}}\ T_f] + [A_{\text{roche résiduelle}}\ (1 - T_f)]$$

En première approximation, on peut considérer que, dès le début de la fusion, l'élément potassium (K) passe intégralement en phase liquide, c'est à dire que $K_{\text{roche résiduelle}} = 0$. La relation précédente devient alors :

$$K_{\text{roche mère}} = K_{\text{magma}}\ T_f$$

● En tout début de fusion (T_f proche de 0), K_{magma} a une valeur élevée, puisque la totalité du potassium de la roche mère se trouve concentrée dans un très petit volume de magma.



La production d'un magma par fusion partielle d'une péridotite. Les dessins représentent des lames minces d'échantillons rocheux observées au microscope polarisant.

4 La fusion partielle d'une péridotite hydratée.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Proposez des hypothèses concernant la roche susceptible d'être à l'origine d'un magma dans une zone de subduction.

2 **DOC. 1 ET 2.** Éprouvez vos hypothèses en positionnant les points A à G (doc. 1) sur les diagrammes P/T du doc.2. Précisez les conditions de pression, de température et d'hydratation permettant la fusion.

3 **DOC. 3 ET 4.** Expliquez l'origine des différences de composition chimique entre la péridotite et l'andésite. Évaluez le taux de fusion de la roche mère du magma dans une zone de subduction.

4 **EN CONCLUSION.** Expliquez l'origine des magmas au niveau d'une zone de subduction.

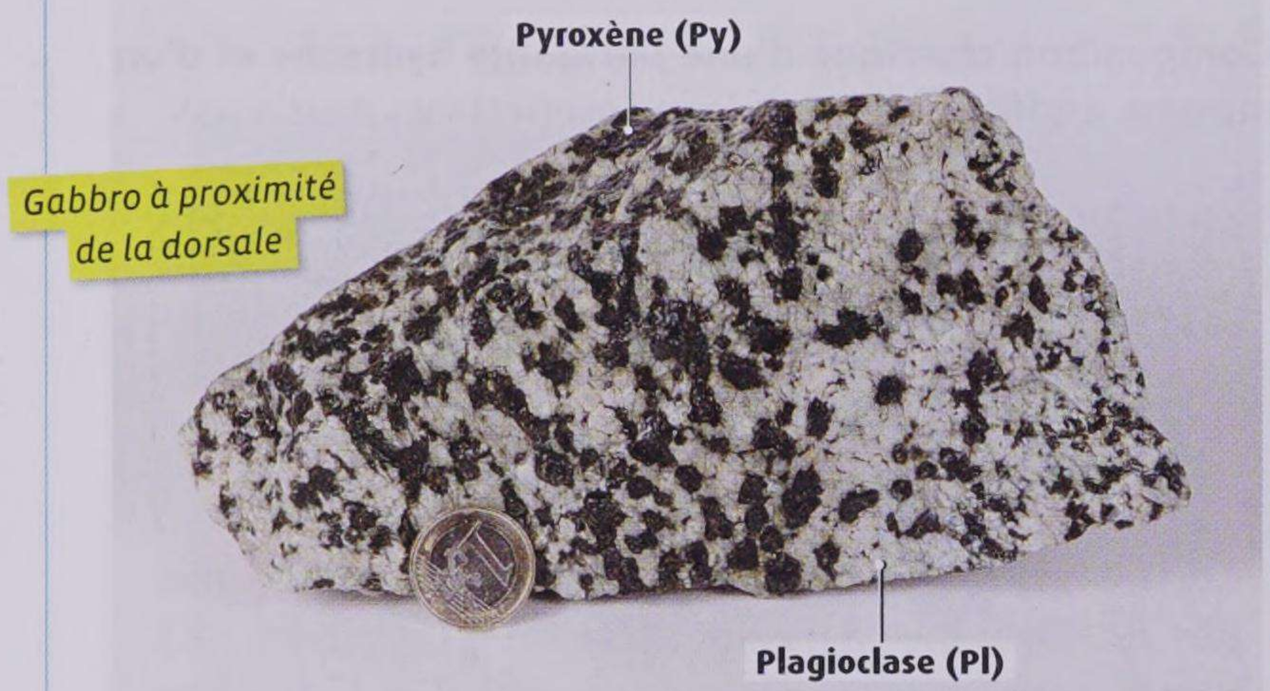
UNITÉ 3

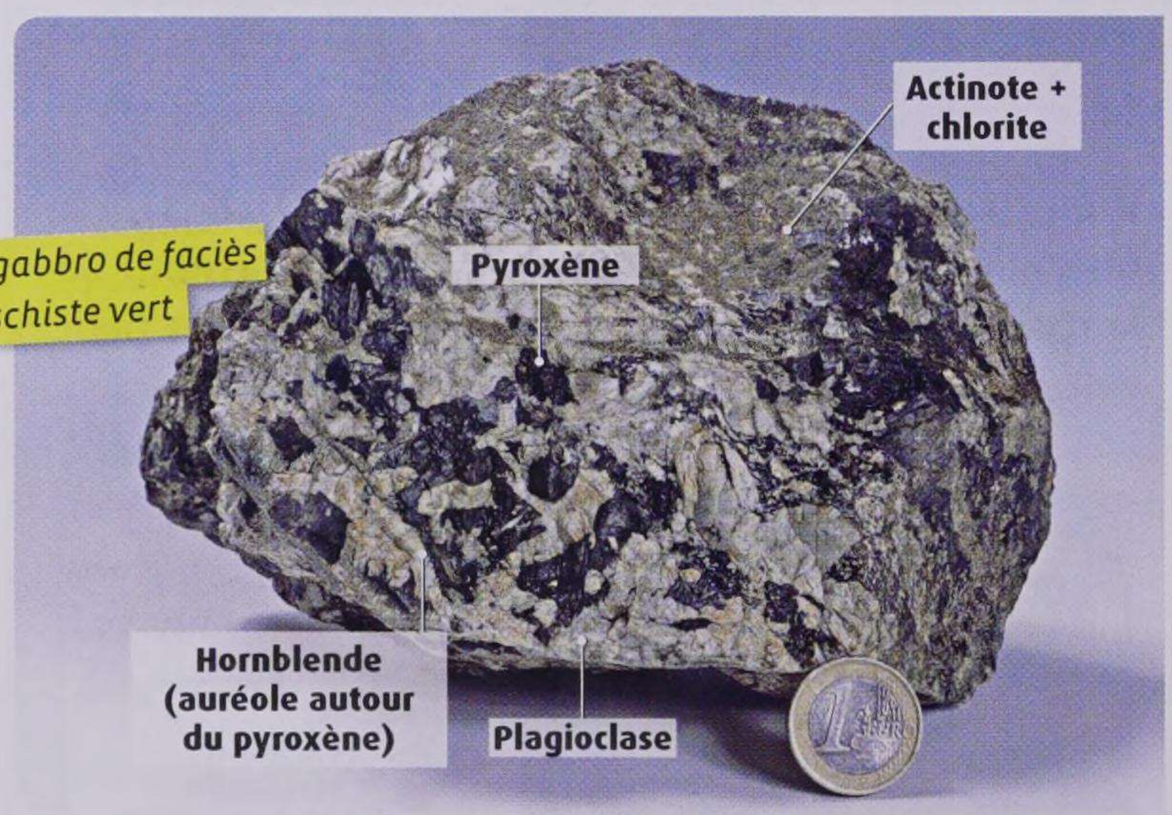
L'hydratation du manteau dans les zones de subduction

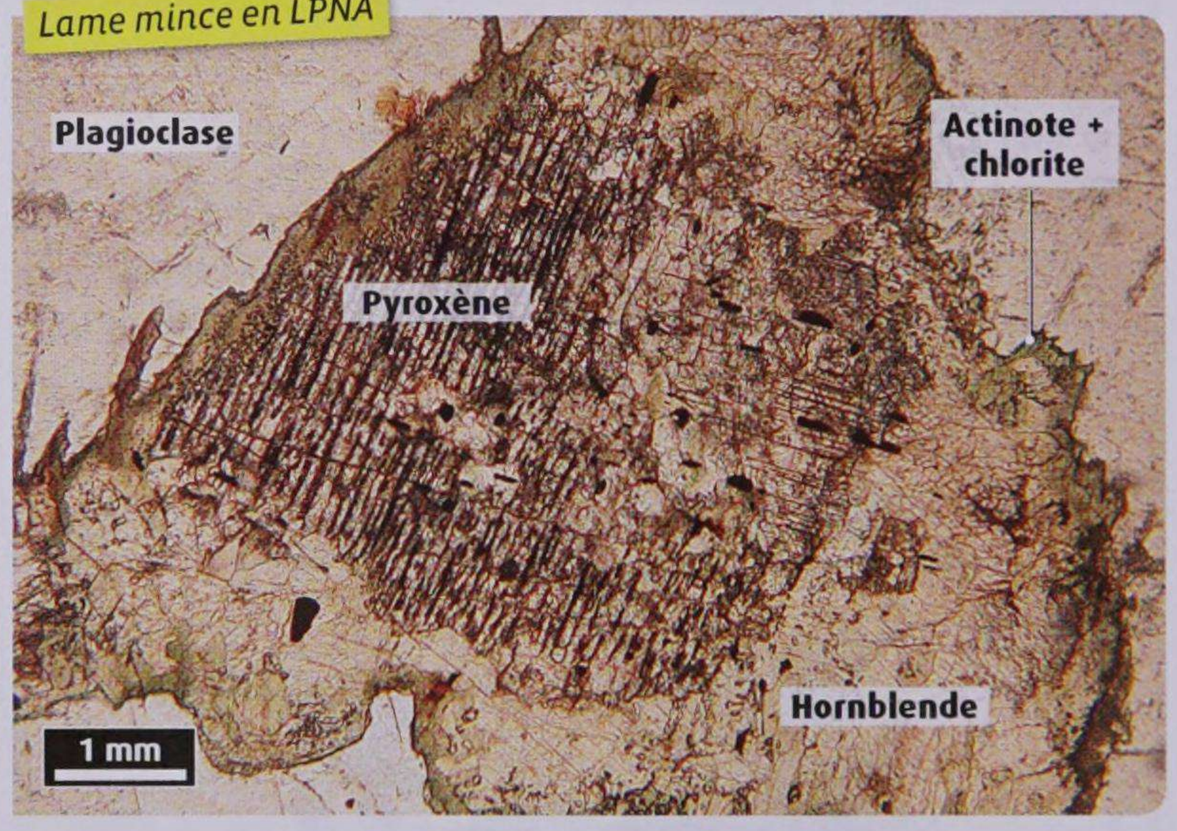
Dans une zone de subduction, les péridotites du manteau chevauchant, si elles sont hydratées, peuvent fondre partiellement et donner un magma andésitique.

Comment le manteau chevauchant peut-il être hydraté dans une zone de subduction ?

L'observation des roches du plancher océanique







1 Un gabbro prélevé à proximité de la dorsale et un métagabbro prévelé sur un plancher océanique âgé de plusieurs dizaines de Ma. Lors de l'expansion océanique, les roches de la croûte océanique sont refroidies. En outre, elles sont hydratées au contact avec l'eau de mer, qui circule en profondeur dans la croûte par un jeu de fractures et de failles. Sous l'effet de ces modifications des conditions physico-chimiques, les roches de la croûte océanique subissent les transformations minéralogiques associées au métamorphisme. Ainsi, le gabbro se transforme en métagabbro de faciès schiste vert.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Comparez la composition minéralogique d'un gabbro et d'un métagabbro du faciès schiste vert.

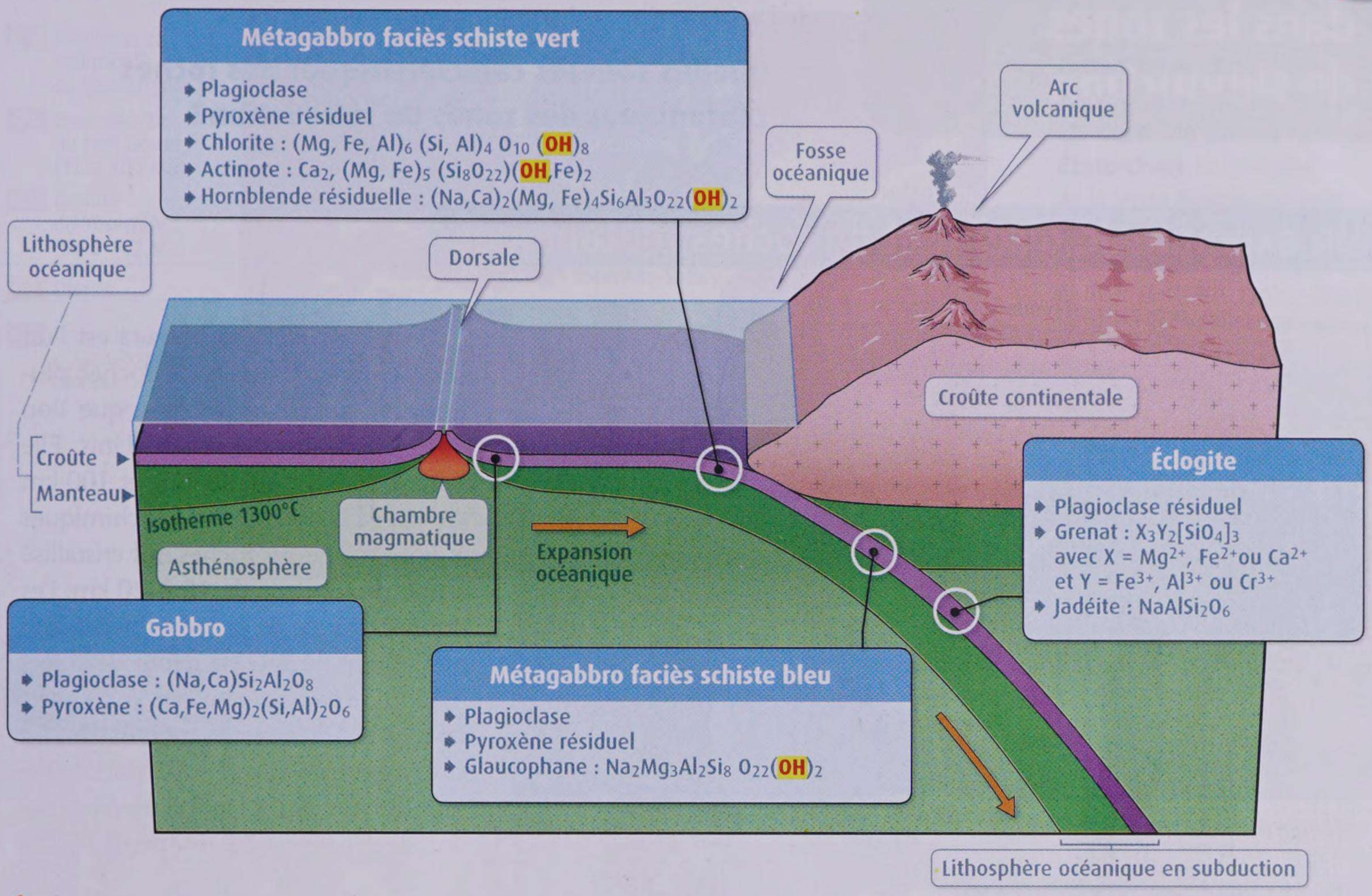
2 **DOC. 2 ET 3.** Identifiez les transformations minéralogiques subies par les roches de la croûte océanique au cours de l'expansion océanique et montrez qu'elles témoignent d'une hydratation.

3 **DOC. 2 ET 3.** Identifiez les transformations minéralogiques subies par les roches de la croûte océanique au cours de la subduction et montrez qu'elles témoignent d'une déshydratation. Indiquez quelles seront les conséquences de ces transformations sur le manteau chevauchant.

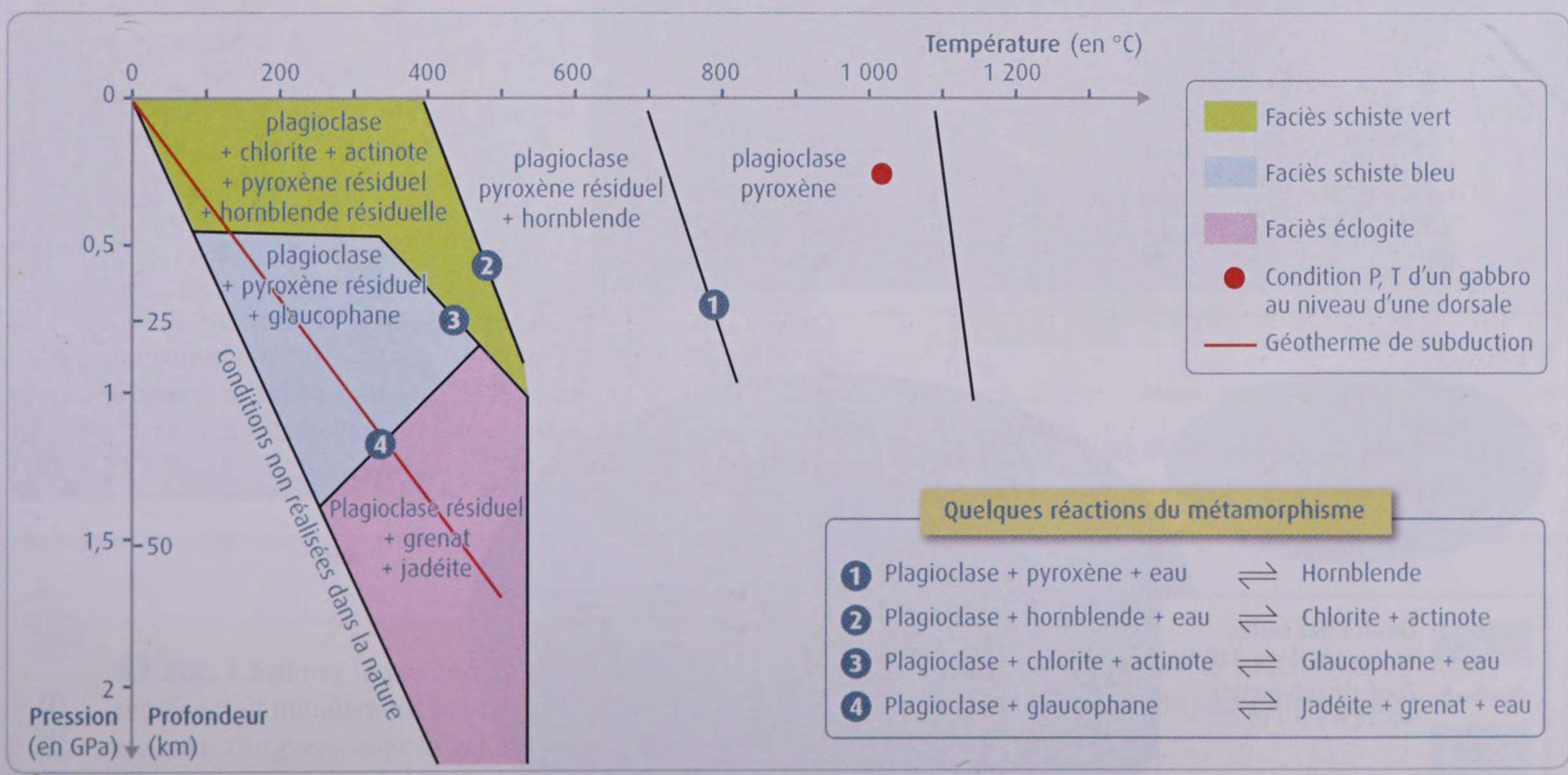
4 **EN CONCLUSION.** Expliquez l'hydratation du manteau chevauchant dans une zone de subduction.

L'étude des transformations minéralogiques

PISTE



2 L'évolution des roches de la croûte océanique depuis leur mise en place à la dorsale jusqu'à leur engagement dans une subduction. La composition minéralogique des différentes roches est indiquée, ainsi que la formule chimique des minéraux. La présence de radicaux hydroxylés (–OH) dans les minéraux d'une roche témoigne de son hydratation (présence d'eau).



3 Transformations minéralogiques et domaine de stabilité de quelques minéraux. Le géotherme de subduction indique l'évolution des conditions de pression et de température (conditions P/T) rencontrées par les roches de la croûte océanique d'une plaque en subduction. Dans ces conditions P/T, les réactions entre minéraux produisent de l'eau qui migre vers la surface et rencontre la lithosphère chevauchante.

UNITÉ 4

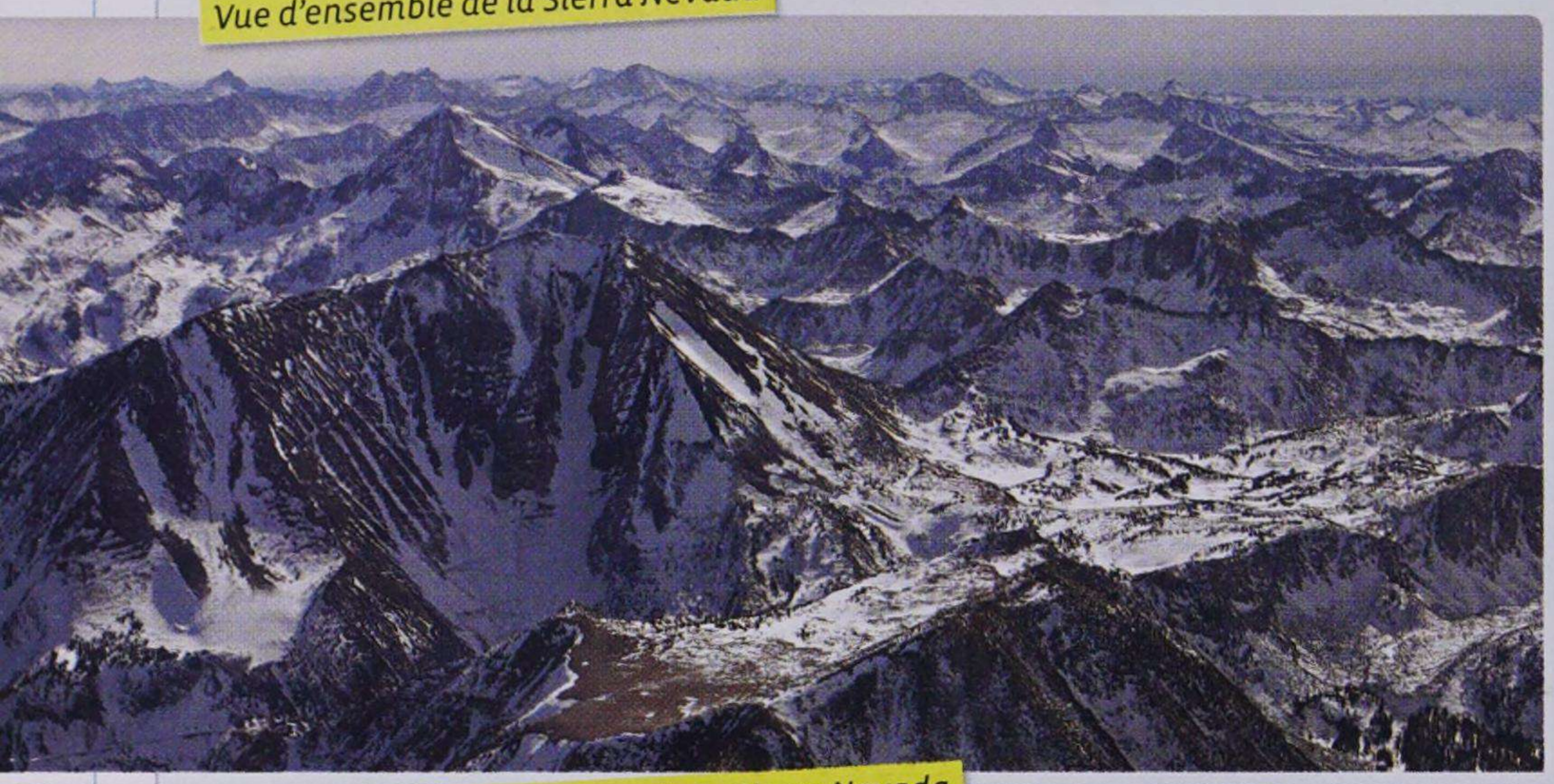
La production de roches plutoniques dans les zones de subduction

Dans les zones de subduction, une partie du magma issu de la fusion partielle des péridotites hydratées de la plaque chevauchante cristallise en profondeur et forme ainsi des roches dites plutoniques.

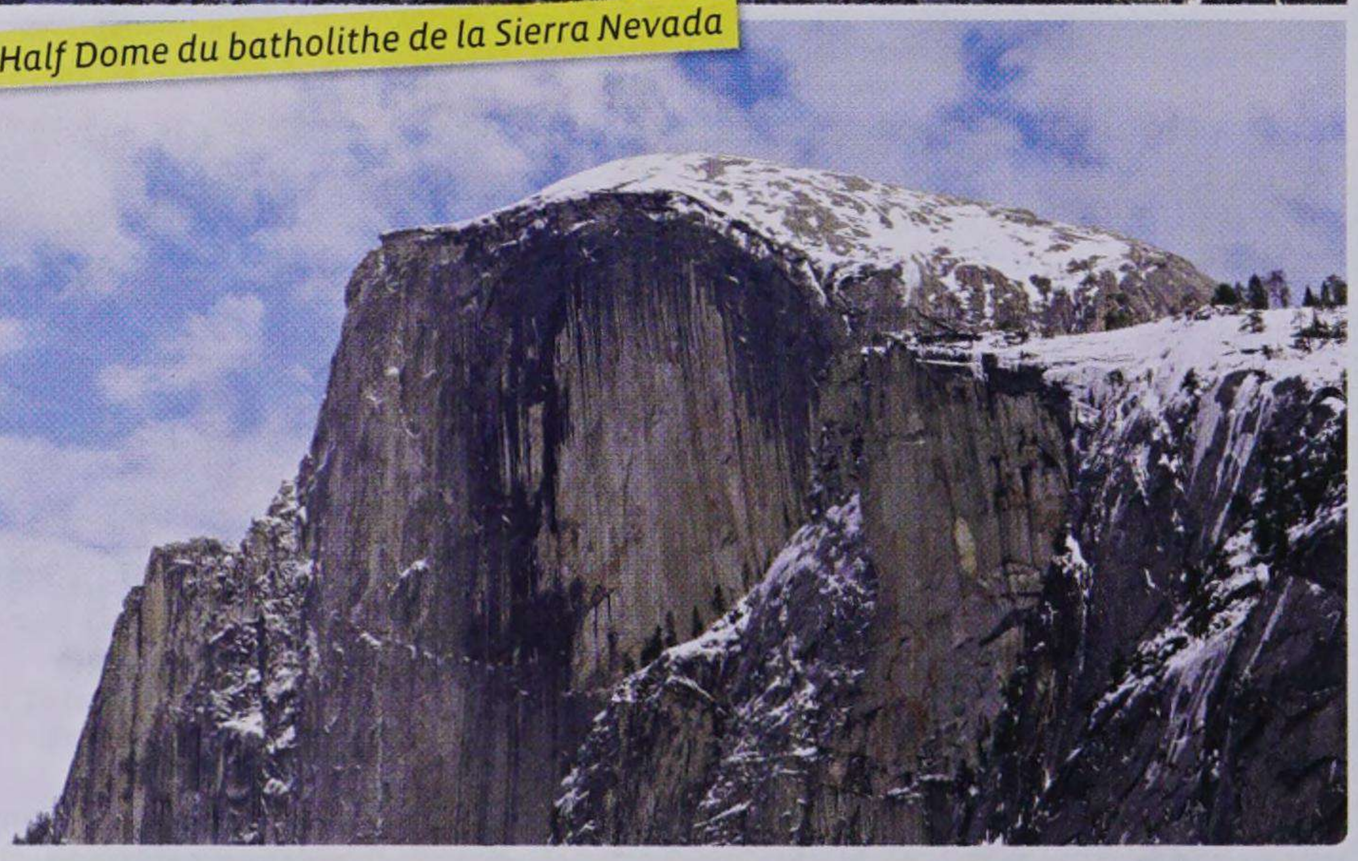
Quelles sont les caractéristiques des roches plutoniques des zones de subduction ?

Un exemple de gisement de roches plutoniques

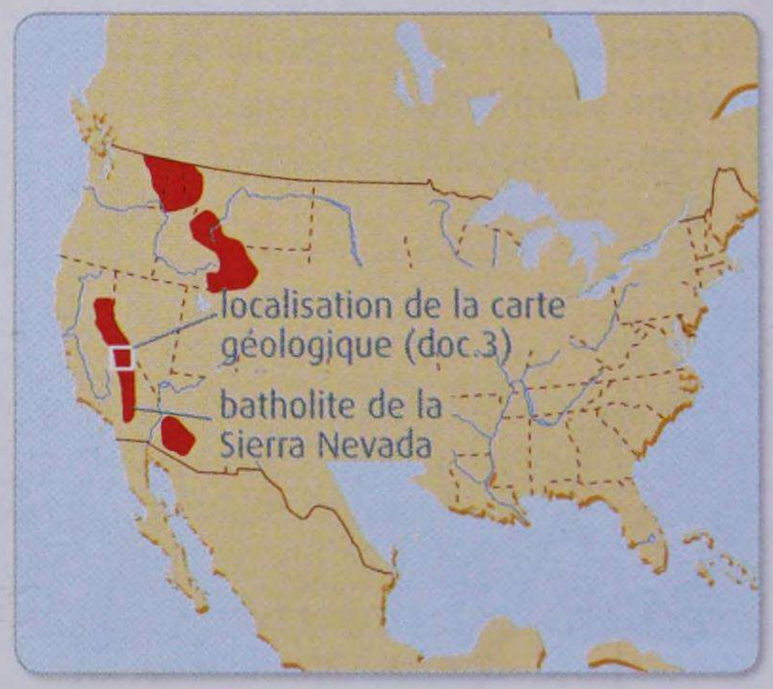
Vue d'ensemble de la Sierra Nevada



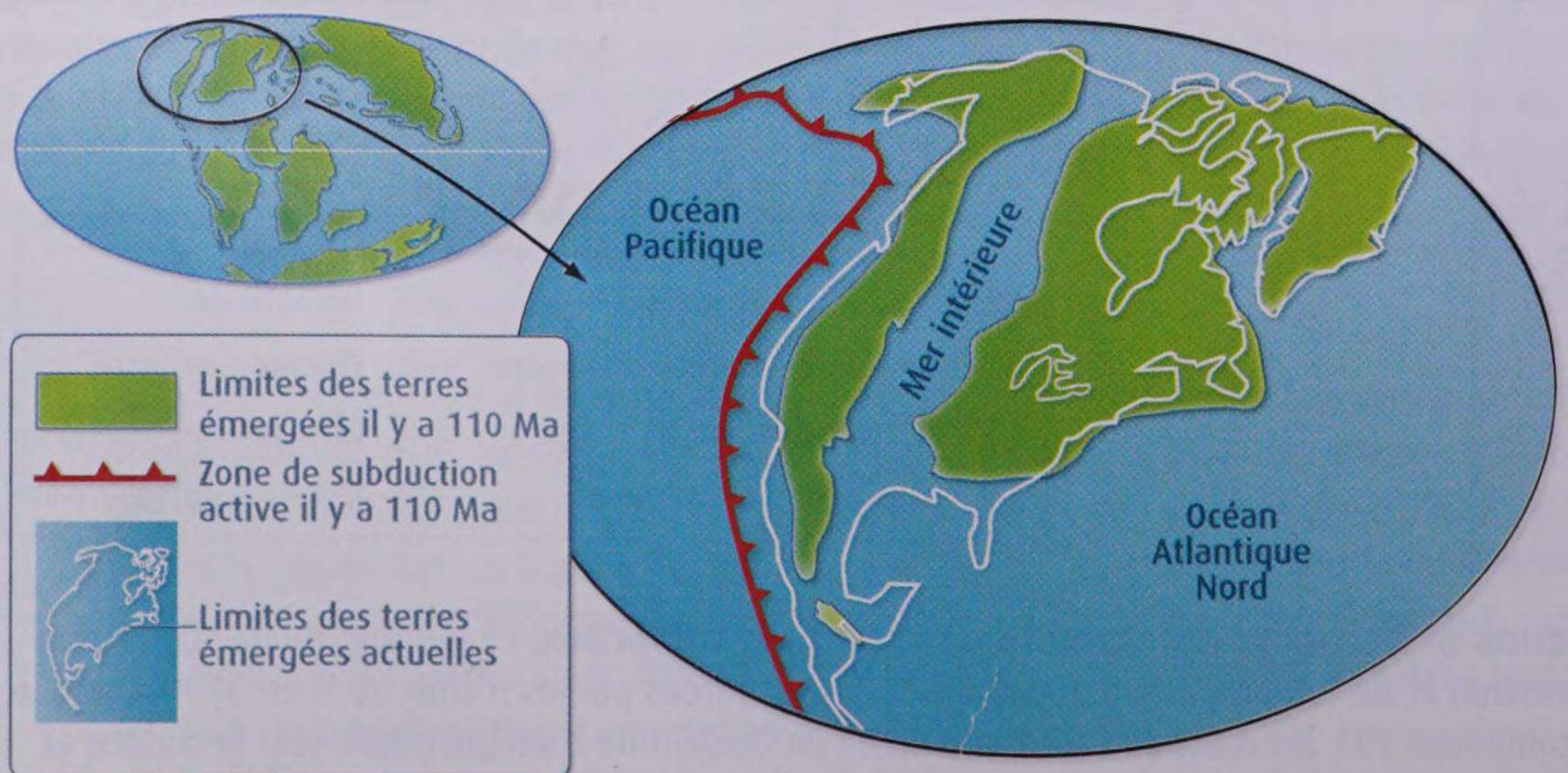
Le Half Dome du batholithe de la Sierra Nevada



La chaîne de la Sierra Nevada est l'un des nombreux massifs de roches plutoniques, appelés batholites, que l'on observe à l'ouest des États-Unis. Elle s'étend sur 640 km de long et 100 km de large. Les données géochimiques indiquent que ces roches ont cristallisé à une profondeur de 10 à 20 km. Les données issues de la radiochronologie permettent de dater le début de la formation de ce batholite vers – 200 Ma, l'essentiel des roches ayant cristallisé au Crétacé entre –120 et – 80 Ma. L'épaisseur des roches du batholite avant l'action de l'érosion a été estimée à 35 km.

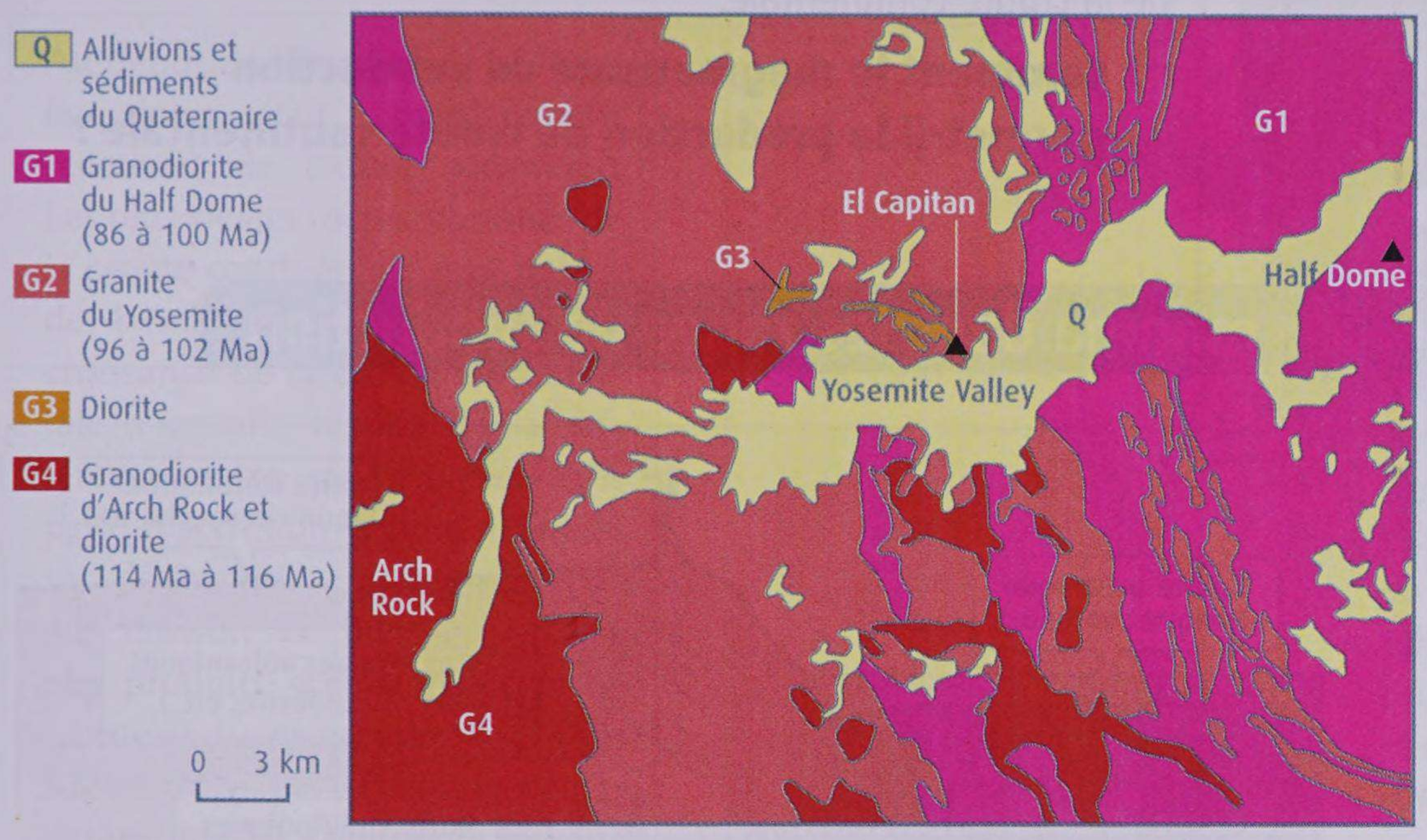


1 Le batholite de la Sierra Nevada (États-Unis).

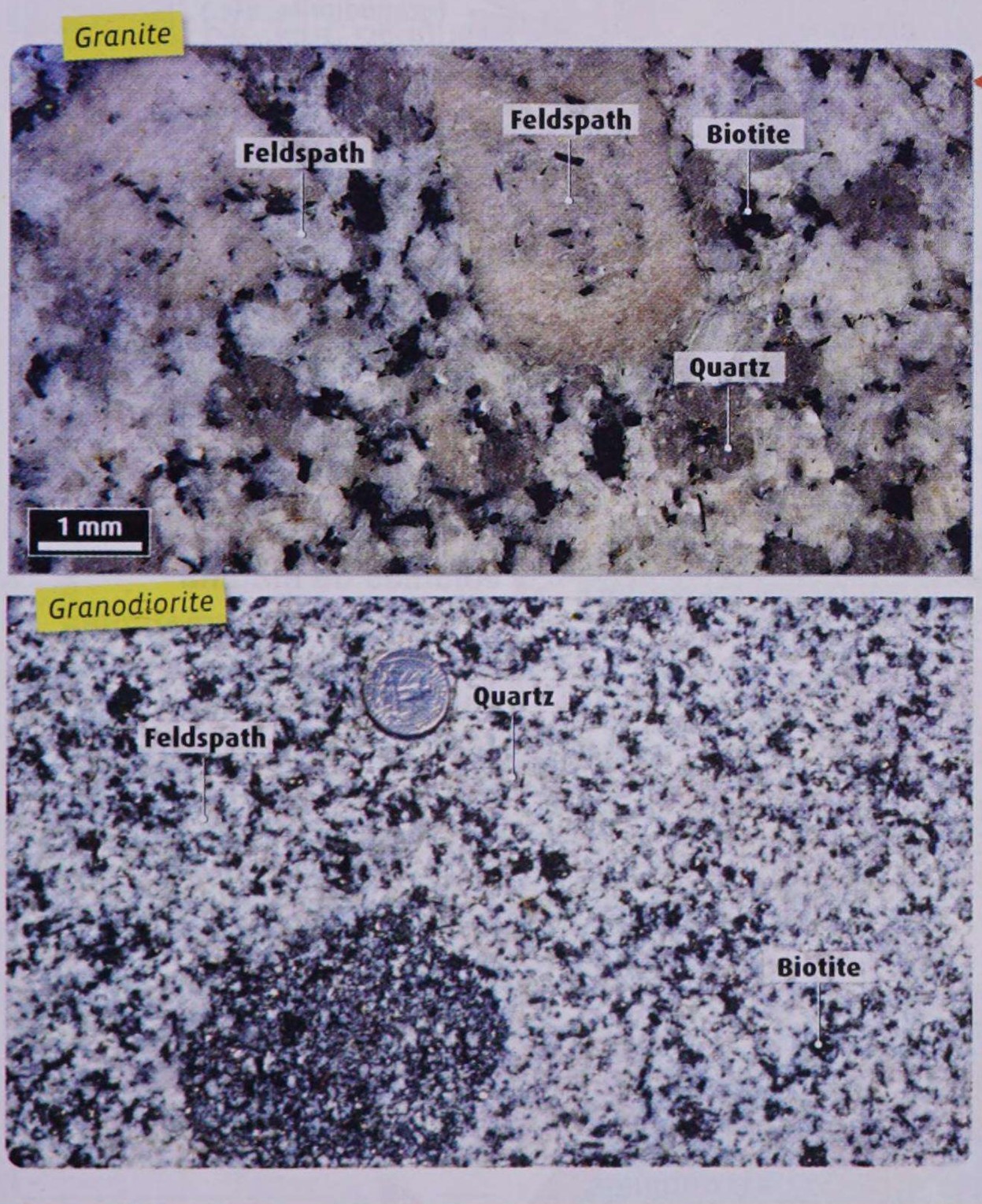


2 Reconstitution du continent nord-américain il y a 110 Ma.

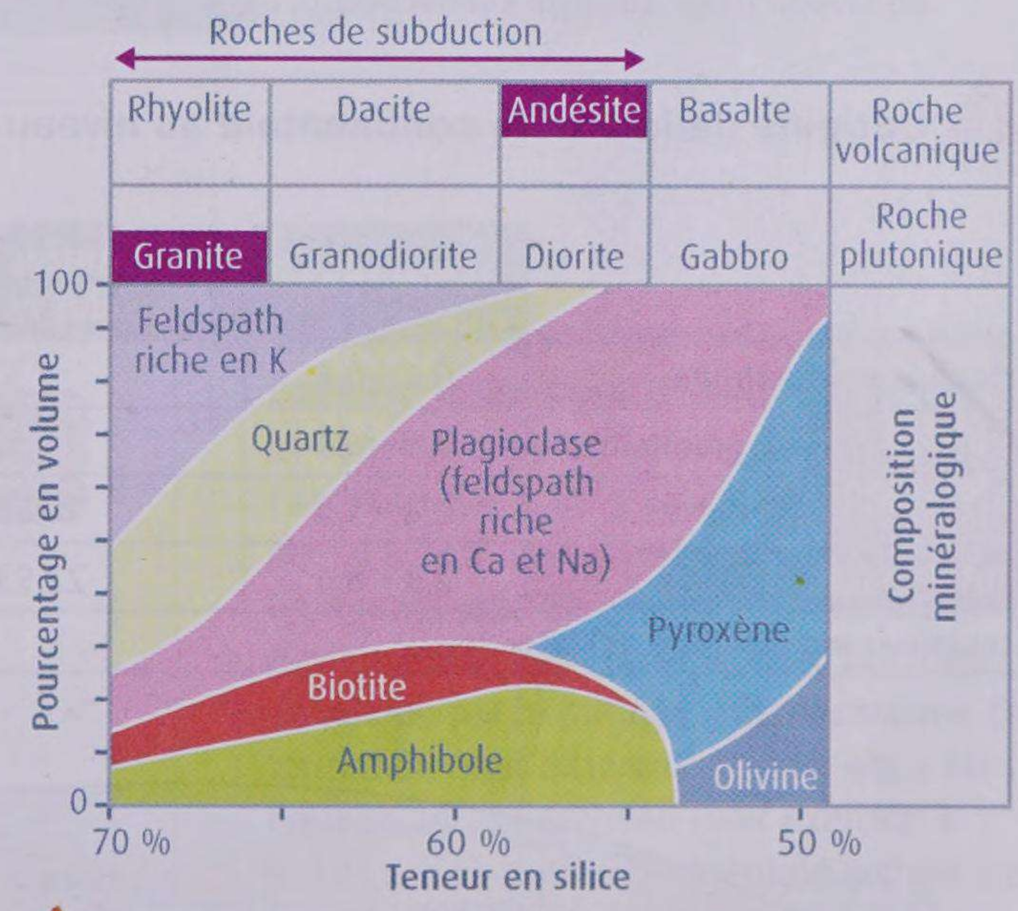
Les roches plutoniques des zones de subduction



3 Extrait de la carte géologique du Parc national du Yosemite (Sierra Nevada, États-Unis). Le batholite de la Sierra Nevada présente une grande diversité de roches plutoniques. Il s'agit de granites et de granitoïdes, c'est-à-dire de roches d'aspect, de minéralogie et de composition proches de ceux du granite (voir doc. 4 et 5). Granites et granitoïdes sont représentatifs des roches magmatiques des zones de subduction qui cristallisent en profondeur.



4 Échantillon de granite et de granodiorite de la Sierra Nevada. Une roche dont tous les cristaux sont visibles à l'œil nu a une structure dite grenue, qui témoigne du refroidissement lent du magma à partir duquel elle s'est formée.



5 Composition minéralogique des roches magmatiques de subduction et du basalte.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Estimez le volume de magma que représentait initialement le batholite de la Sierra Nevada. Comparez avec le volume émis lors de l'éruption du Merapi (unité 1).
2. **DOC. 1 ET 2.** Montrez que la formation du batholite est associée à un contexte de subduction.
3. **DOC. 3 ET 4.** Montrez que la structure des granites et granitoïdes témoigne de leur mise en place en profondeur.
4. **DOC. 4 ET 5.** Déterminez quelques points communs et différences entres les différents granitoïdes.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques des roches plutoniques des zones de subduction.

UNITÉ 5

La fabrication de la croûte continentale

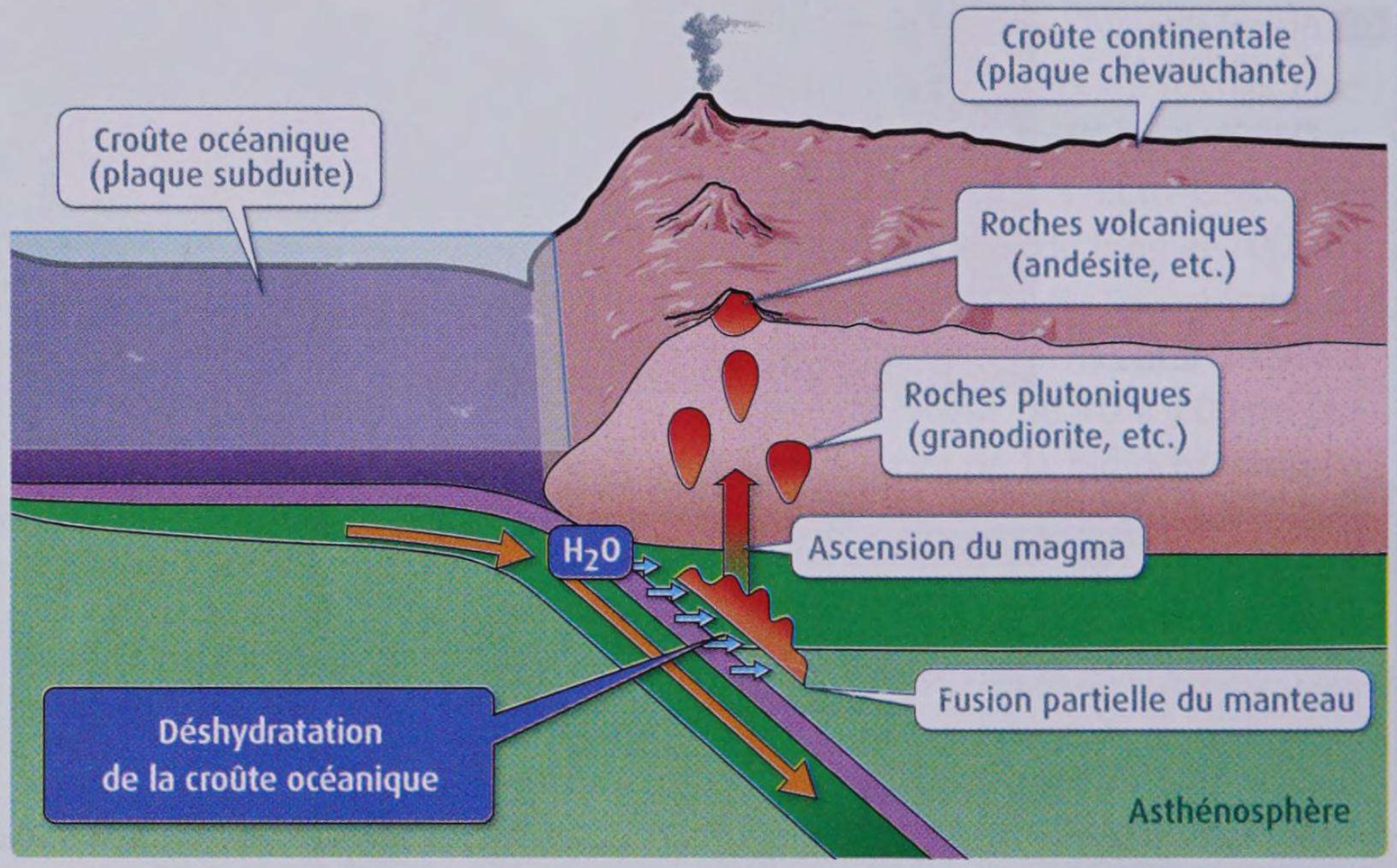
Le magmatisme des zones de subduction produit des roches de type granite et granitoïde. Ce sont les roches constitutives de la croûte continentale.

Comment le magmatisme de subduction permet-il la production de croûte continentale ?

La production actuelle de magma dans les zones de subduction

« Former de la croûte continentale, c'est extraire des liquides magmatiques à composition de granite et de granodiorite, riches en Si, Al, Na et K, à partir d'un manteau ultrabasique, c'est-à-dire riche en Mg, Fe, Ca et relativement pauvre en Si. »

Hervé Martin, géologue (d'après le site Planet-Terre de l'ENS Lyon)



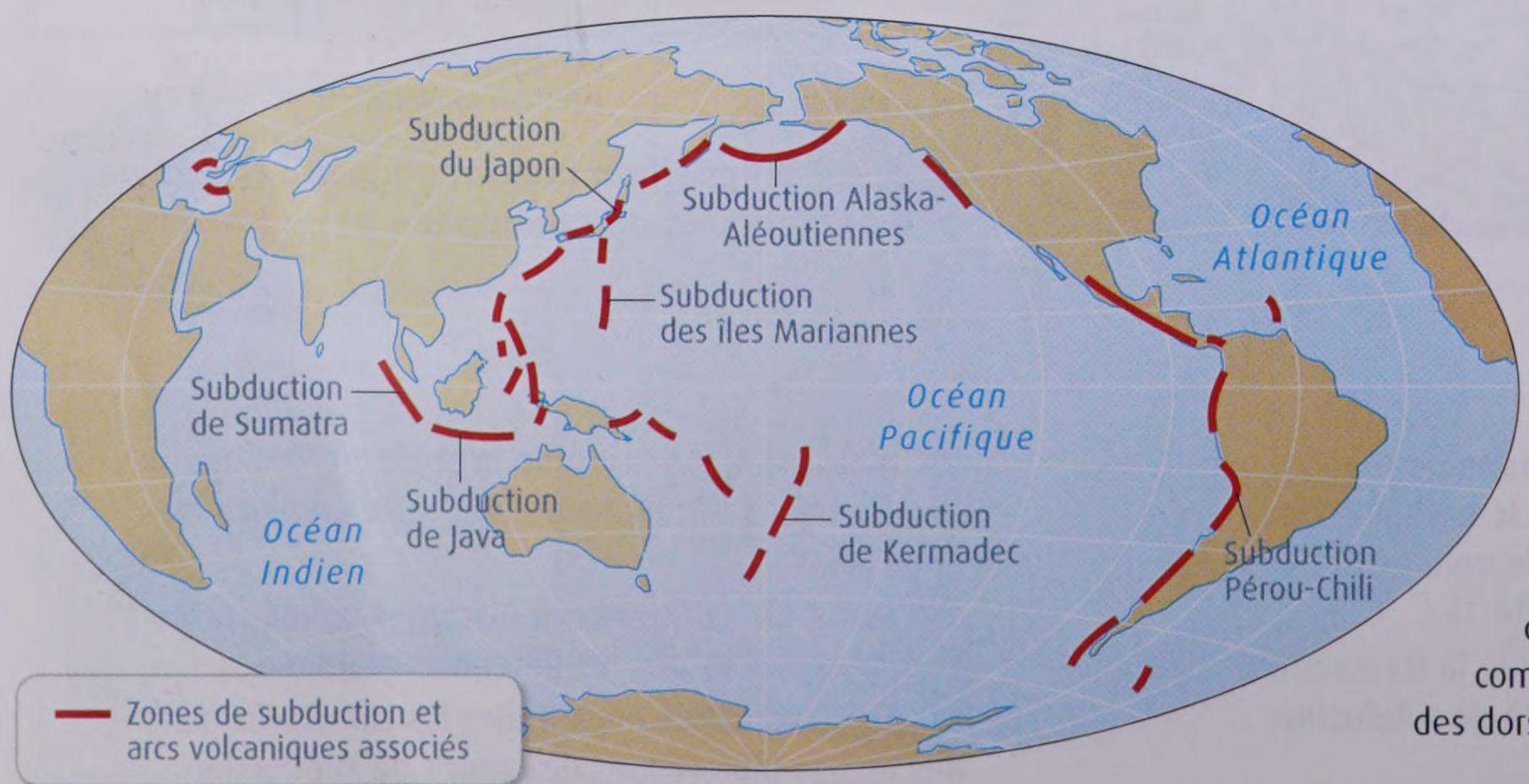
La fabrication de la croûte continentale au niveau d'une zone de subduction.

1 L'origine de la croûte continentale au niveau d'une zone de subduction.

		Subductions	Autres contextes (dorsales et points chauds)	Total
Roches volcaniques		0,4 – 0,6	3,33 – 3,5	3,73 – 4,1
Roches plutoniques	granitoïdes	2,1 – 6,8	0,72 – 1,4	2,82 – 8,2
	autres	0,4 – 1,2	18,88 – 20,46	19,28 – 21,66
Total magma		2,9 – 8,6	22,93 – 25,36	25,83 – 33,96

Les valeurs sont exprimées en $km^3.an^{-1}$

2 Volumes de magma et de roches magmatiques produits actuellement à l'échelle du globe. Le volume de la croûte continentale sur l'ensemble de la Terre est d'environ 7 milliards de km^3.

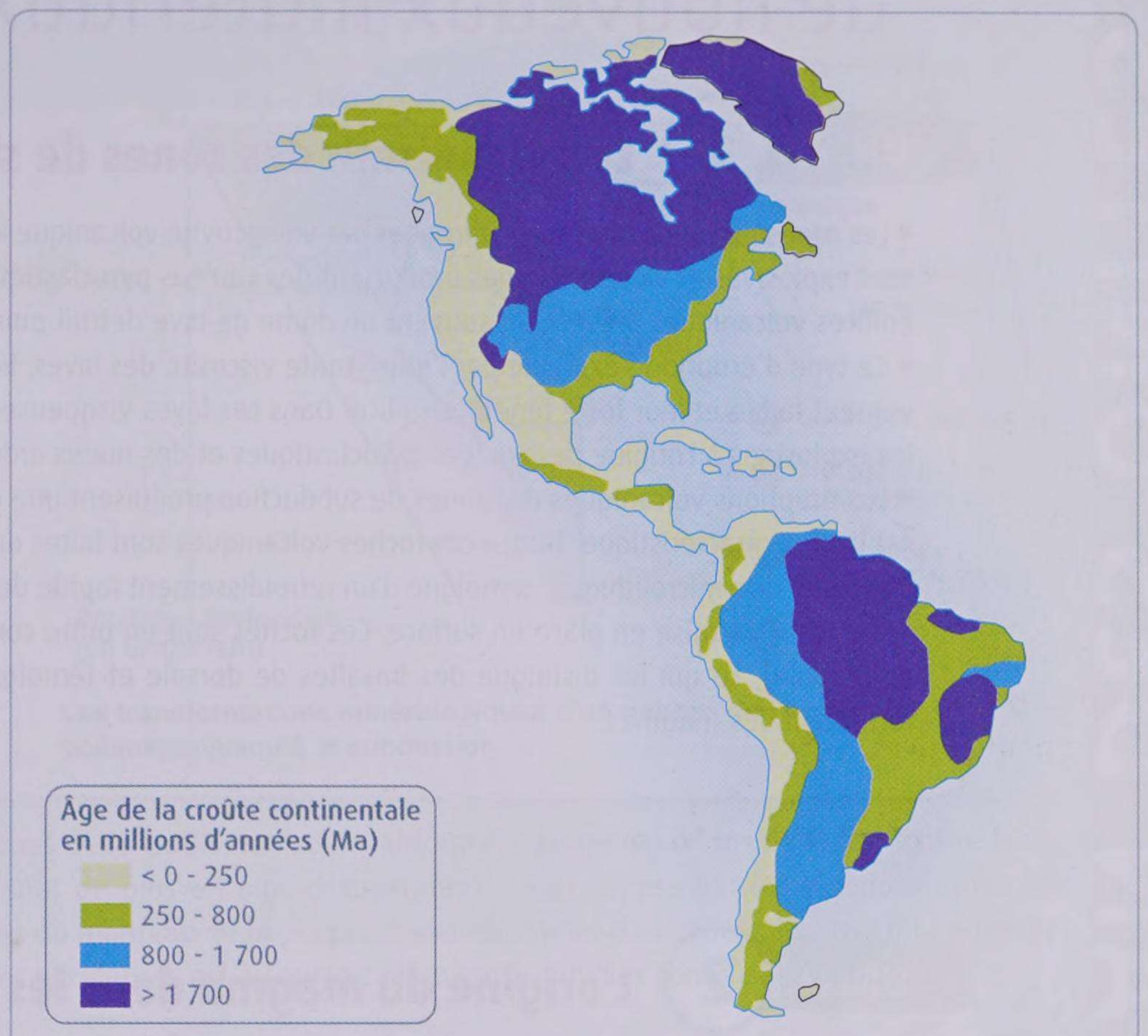


3 Répartition actuelle des zones de subduction. Les zones de subduction ont une longueur cumulée de près de 45 000 km (dont près de 25 000 km pour « la ceinture de feu » autour du Pacifique). Par comparaison, la longueur cumulée des dorsales est de 60 000 km.

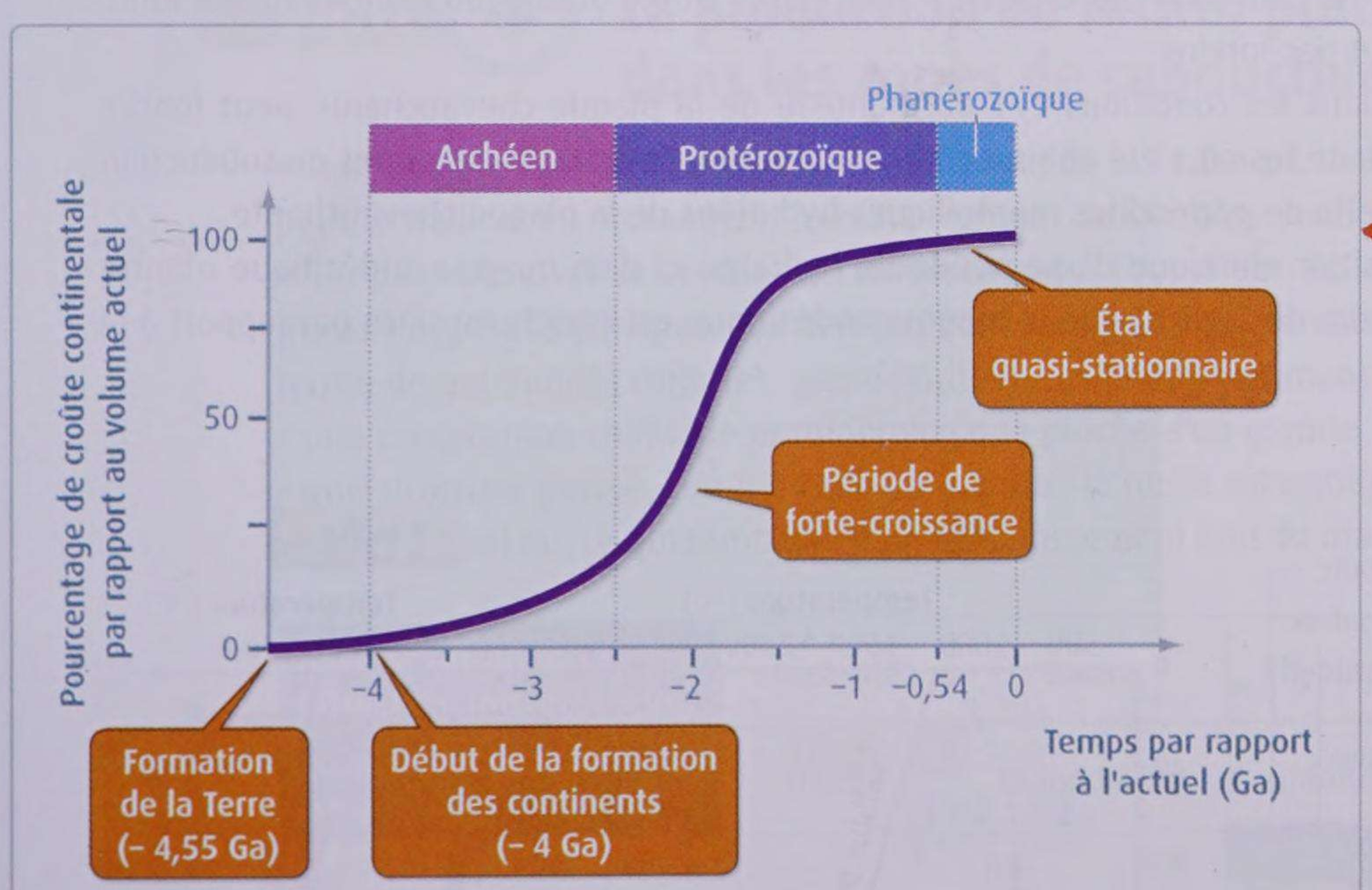
La croissance des continents dans l'histoire du globe

Au début de l'histoire de la Terre, le globe était complètement recouvert de croûte océanique. Les plus vieilles roches connues de la croûte continentale sont datées de 4 milliards d'années (Ga). La croissance de la croûte continentale a ensuite résulté de la différence entre sa formation (on parle d'accrétion continentale) et sa destruction (essentiellement par érosion et puis disparition des produits d'érosions dans le manteau au niveau des zones de subduction). Les géologues considèrent que les continents se sont agrandis par leur périphérie : ils parlent de croissance centrifuge. Aujourd'hui, la croûte continentale couvre environ 45 % de la surface de la Terre.

4 Création et destruction de la croûte continentale.



5 L'âge de la croûte continentale du continent américain.



6 Évolution du volume total de croûte continentale depuis la formation de la Terre. La croûte continentale formée à l'Archéen (période géologique qui s'étend de – 4 à –2,5 Ga) n'a pas la composition de type granitoïde de la croûte continentale formée entre – 2,5 Ga et aujourd'hui. Cela s'explique par le fait que son mécanisme de formation était différent de celui qui a été à l'œuvre après l'Archéen (voir exercice 3 p. 196) : si la croûte continentale archéenne a été formée dans des zones de subduction, elle ne résulte pas de la fusion partielle des mêmes roches.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Identifiez le contexte privilégié de fabrication de la croûte continentale.
2 **DOC. 2.** Estimez le temps qu'il aurait fallu pour produire le volume présent de croûte continentale au rythme actuel de production. Concluez.
3 **DOC. 3 À 5.** Argumentez et expliquez la croissance centrifuge des continents.
4 **DOC. 4 ET 6.** Expliquez l'évolution de la croissance de la croûte continentale depuis 4 milliards d'années.
5 **EN CONCLUSION.** Discutez du rôle du magmatisme des zones de subduction dans la production de croûte continentale.

CHAPITRE 3

La production de nouveaux matériaux continentaux

UNITÉ 1 Le volcanisme des zones de subduction

• Les zones de subduction sont marquées par une activité volcanique importante et caractéristique. Les éruptions sont explosives et violentes : elles produisent des coulées pyroclastiques et des nuées ardentes meurtrières. Les édifices volcaniques présentent souvent un dôme de lave détruit puis reformé lors des différentes éruptions.

• Ce type d'éruption s'explique par l'importante viscosité des laves, liée en particulier à leur température relativement faible et leur forte teneur en silice. Dans ces laves visqueuses, les gaz s'accumulent, jusqu'à provoquer les explosions à l'origine des coulées pyroclastiques et des nuées ardentes.

• Les éruptions volcaniques des zones de subduction produisent une grande diversité de roches, dont l'andésite est la plus caractéristique. Toutes ces roches volcaniques sont faites de petits cristaux allongés et de verre : cette structure, dite microlithique, témoigne d'un refroidissement rapide de la lave à partir de laquelle s'est formée la roche, lié à sa mise en place en surface. Ces roches sont en outre constituées de minéraux hydroxylés (biotite, amphibole), ce qui les distingue des basaltes de dorsale et témoigne du rôle prépondérant de l'eau dans la formation des magmas.

UNITÉ 2 L'origine du magma dans les zones de subduction

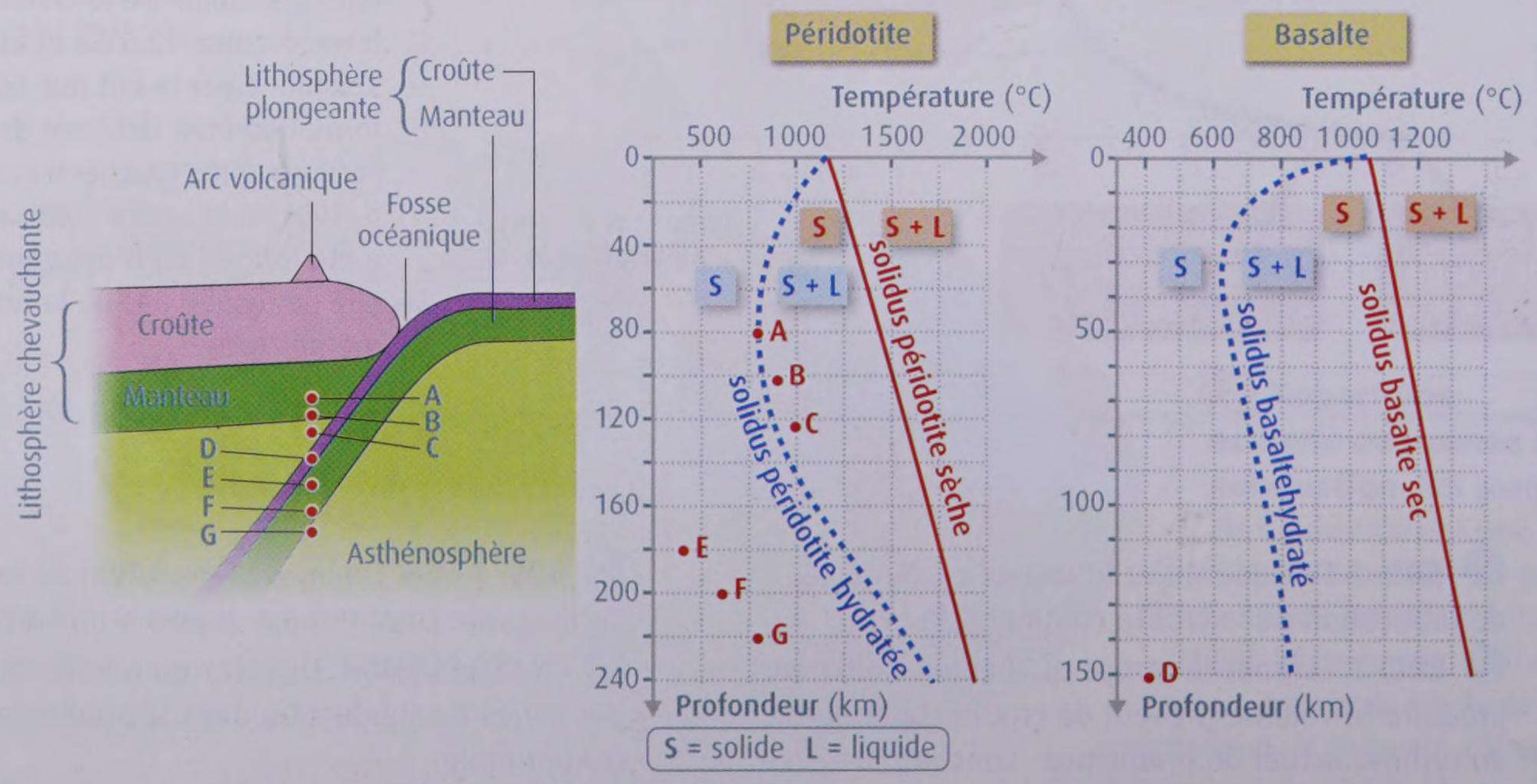
• L'étude au laboratoire de la fusion de roches dans différentes conditions de pression et de température (P/T) montre que, dans un contexte de subduction :

– un basalte anhydre ou hydraté ne peut pas fondre. Ce n'est donc pas la croûte océanique plongeante qui fond.

– une péridotite anhydre ne peut pas fondre.

– seule une péridotite placée dans les conditions P/T du manteau de la plaque chevauchante peut fondre partiellement, si sa température de fusion a été abaissée par hydratation. Le magma des zones de subduction provient donc de la fusion partielle de péridodites mantelliques hydratées de la plaque chevauchante.

• La comparaison de la composition chimique d'une péridotite hydratée et d'un magma andésitique montre que le taux de fusion est de l'ordre de 10 % et que le magma andésitique est enrichi en silice par rapport à la péridotite.

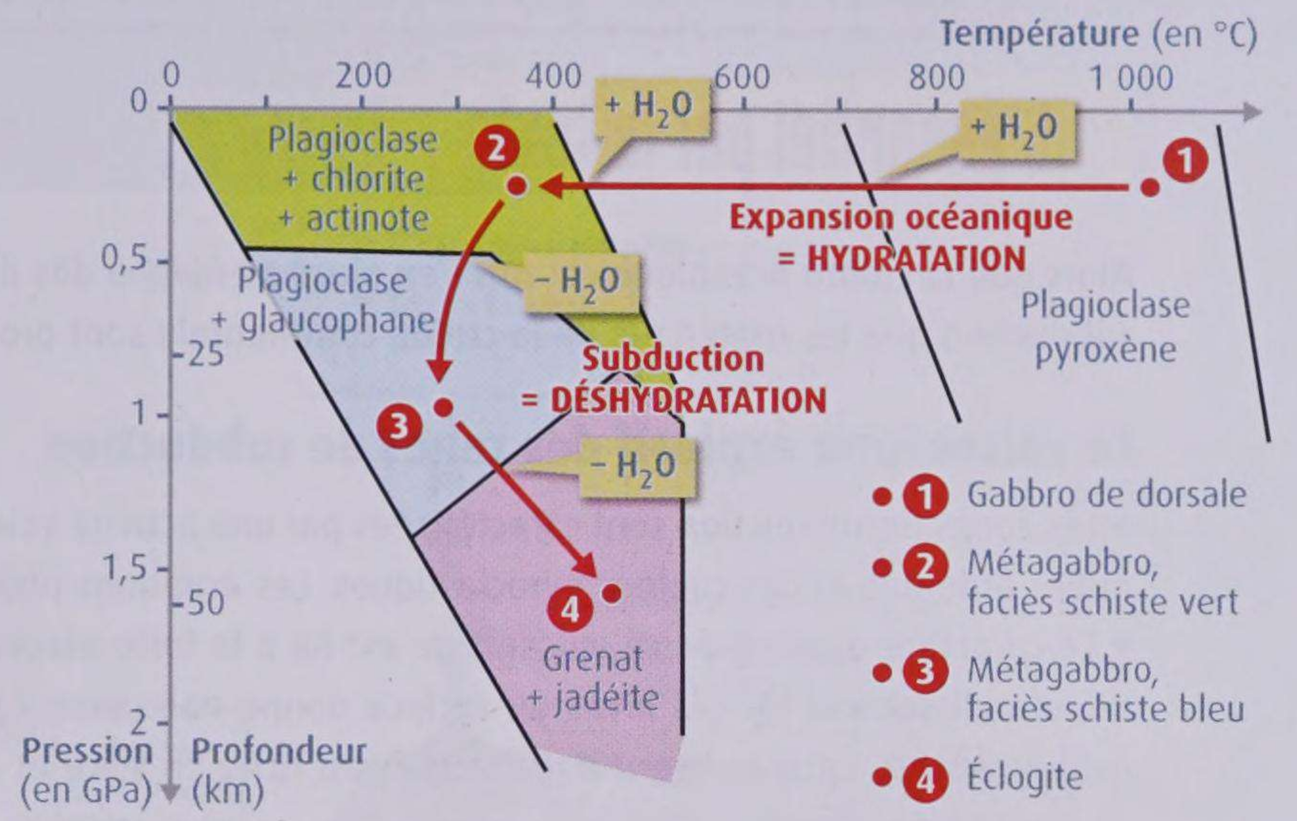


La recherche expérimentale des conditions de fusion au niveau d'une zone de subduction.

UNITÉ 3 L'hydratation du manteau dans les zones de subduction

• Au cours de l'expansion océanique, la croûte océanique est en contact avec l'eau. Son refroidissement et son hydratation sont à l'origine d'un métamorphisme qui transforme la minéralogie des roches. Les gabbros sont ainsi transformés en métagabbros de faciès schiste vert. Ces roches sont hydratées, comme en témoigne la présence de minéraux hydroxylés (chlorite, actinote).

• Lorsque la lithosphère océanique entre en subduction, les variations de pression et de température entraînent de nouvelles transformations minéralogiques au sein des roches de la croûte, qui sont tranformées en métagabbros de faciès schiste bleu, puis en éclogites. Ces roches sont de plus en plus déshydratées. L'eau libérée par les réactions entre les minéraux hydrate les péridotites du manteau de la plaque chevauchante et contribue à abaisser leur point de fusion. La fusion partielle de ces péridotites est à l'origine du magma dans les zones de subduction.



Les transformations minéralogiques d'un gabbro de l'expansion océanique jusqu'à la subduction.

UNITÉ 4 La production de roches plutoniques dans les zones de subduction

• Dans les zones de subduction, le magma issu de la fusion partielle du manteau de la plaque chevauchante peut cristalliser en profondeur, formant, au sein de la croûte continentale, des roches plutoniques.

• On peut observer ces roches à l'affleurement à l'ouest des États-Unis par exemple, où elles forment des massifs appelés batholites. Ces derniers sont constitués de granites et de diverses roches regroupées sous le terme de granitoïdes (diorites, granodiorites). Les points communs des granitoïdes sont :

- une composition chimique et minéralogique proche d'un granite ;
- une structure grenue, comme celle du granite : la roche est entièrement cristallisée et formée de minéraux visibles à l'œil nu, ce qui témoigne d'un refroidissement lent du magma à partir duquel elles se sont formées.

Roches volcaniques (structure microlithique)	Andésite	Dacite	Rhyolite
Roches plutoniques (structure grenue)	Diorite	Granodiorite	Granite

Les différentes roches produites par le magmatisme de subduction.

UNITÉ 5 La fabrication de la croûte continentale

• À l'échelle du globe, plus de 85 % du magma produit dans les zones de subduction cristallise en profondeur, formant des granites et des granitoïdes, et produisant ainsi de nouveaux matériaux continentaux. Les zones de subduction sont en outre à l'origine de 75 à 85 % des granites et des granitoïdes produits sur notre planète.

• Les zones de subduction sont donc le contexte géologique privilégié de fabrication de la croûte continentale à partir d'un magma d'origine mantellique. Actuellement, cette production de croûte continentale est compensée par sa disparition par érosion puis subduction. La croissance des continents est donc nulle.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 3

La production de nouveaux matériaux continentaux

L'essentiel par le texte

Alors que la croûte océanique est mise en place au niveau des dorsales, c'est essentiellement dans les zones de subduction que les matériaux de la croûte continentale sont produits.

Le volcanisme explosif des zones de subduction

- Les zones de subduction sont caractérisées par une activité volcanique fréquemment explosive, qui produit des nuées ardentes et des coulées pyroclastiques. Les éruptions peuvent provoquer des dégâts importants.
- Le caractère explosif de ce volcanisme est lié à la forte **viscosité** des laves émises et à leur richesse en gaz. Le refroidissement de ces laves en surface donne naissance à des roches volcaniques, dont la plus fréquente est l'**andésite**. Cette **roche microlithique** est riche en silice et en minéraux comprenant des groupements –OH (minéraux hydroxylés).

L'origine du magma dans les zones de subduction

- Au cours de l'expansion océanique, la croûte océanique emmagasine de l'eau lors de réactions métamorphiques qui produisent des minéraux hydroxylés. Lorsqu'elle se trouve impliquée dans une subduction, cette croûte subit un nouveau métamorphisme lié à l'augmentation de la pression et de la température. Les transformations minéralogiques associées entraînent une déshydratation des minéraux et donc une libération d'eau. Cette eau percole dans le manteau sous-jacent à la plaque chevauchante et abaisse le point de fusion des péridotites, à l'origine d'une fusion partielle de ces dernières.
- La fusion partielle des péridotites mantelliques de la plaque chevauchante donne un magma de composition moyenne andésitique et une roche résiduelle appauvrie.

Le magmatisme de subduction, un « fabricant » de croûte continentale

- Une fraction du magma produit en profondeur arrive en surface et alimente les volcans. La majeure partie de ce magma cristallise en profondeur dans la croûte, formant des roches plutoniques. Ces **roches grenues** sont des granites et des roches de composition globalement granitique : les **granitoïdes**.
- Le magmatisme des zones de subduction produit ainsi, à partir de péridotite mantellique, de nouveaux matériaux continentaux.

Les capacités et attitudes

- Observer à différentes échelles les roches magmatiques mises en place dans une zone de subduction **(unités 1 et 4)**
- Utiliser des modes de représentation des sciences expérimentales **(unité 1)**
- Formuler puis éprouver des hypothèses **(unité 2)**
- Comparer les compositions minéralogiques d'un basalte et d'une andésite ou d'un gabbro et d'un métagabbro **(unités 1 et 3)**
- Calculer un volume **(unité 4)** ou une durée **(unité 5)**

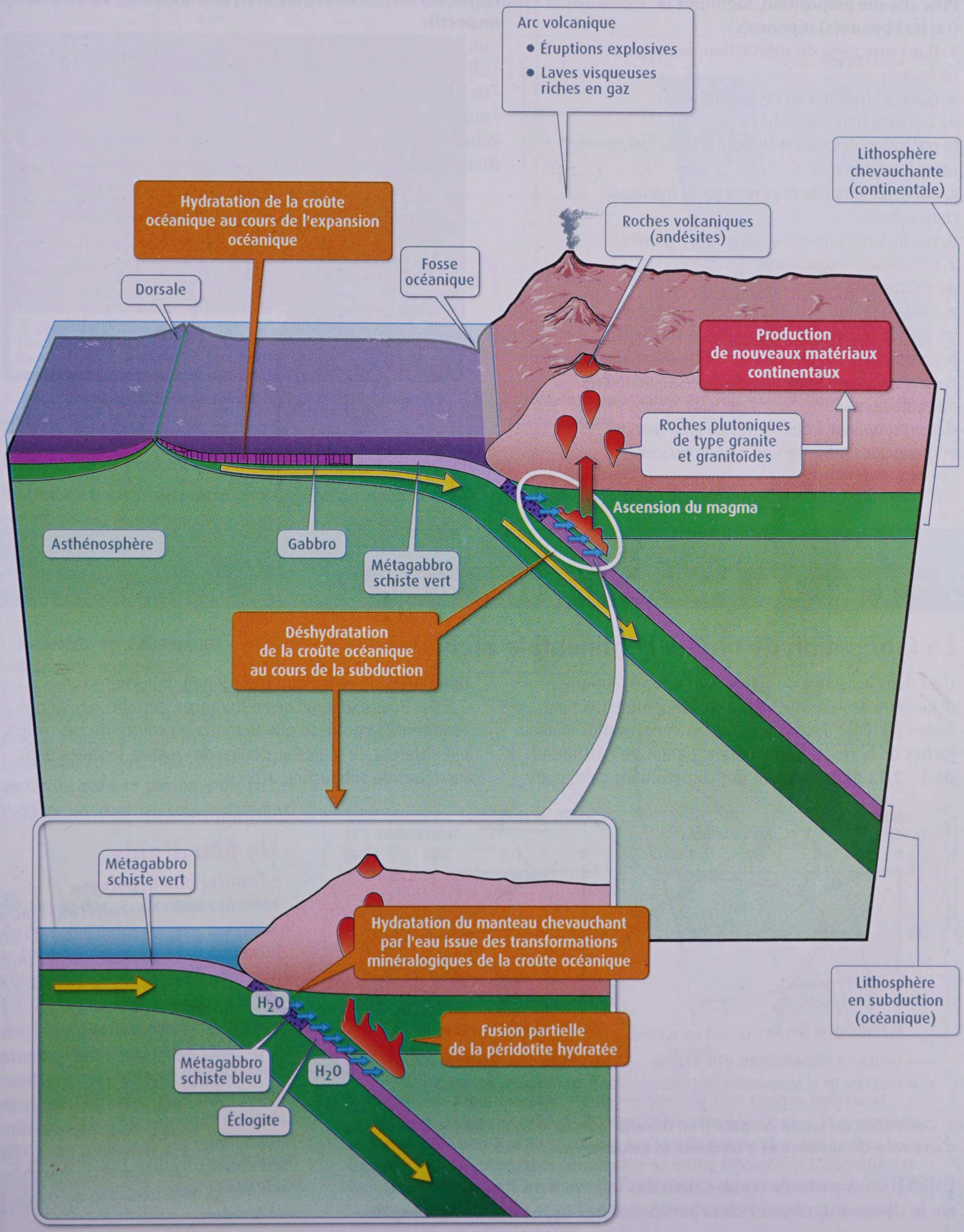
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Andésite : roche volcanique microlithique caractéristique des zones de subduction. Elle est constituée essentiellement de verre, de plagioclase et de minéraux hydroxylés (biotite et amphibole).
Granitoïde : ensemble des roches grenues à composition chimique et minéralogique globalement granitique.
Roche grenue : roche dont tous les éléments sont cristallisés et les cristaux visibles à l'œil nu.
Roche microlithique : roche contenant du verre et de petits cristaux allongés non visibles à l'œil nu.
Viscosité : résistance qu'un corps déformable oppose à l'écoulement. Les laves émises dans les zones de subduction sont visqueuses et s'accumulent au sommet du volcan, créant un dôme de lave.

L'essentiel par l'image

La production de nouveaux matériaux continentaux



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Dans une zone de subduction, le magma se forme :

a. grâce à l'hydratation de la péridotite de la lithosphère subduite.

b. par fusion des roches hydratées de la croûte océanique subduite.

c. par hydratation de la péridotite du manteau chevauchant.

d. par fusion totale d'une péridotite hydratée.

2. Les roches plutoniques des zones de subduction :

a. sont quantitativement plus importantes que les roches volcaniques des zones de subduction.

b. contribuent à la création de croûte océanique.

c. correspondent à une grande diversité de roches microlithiques.

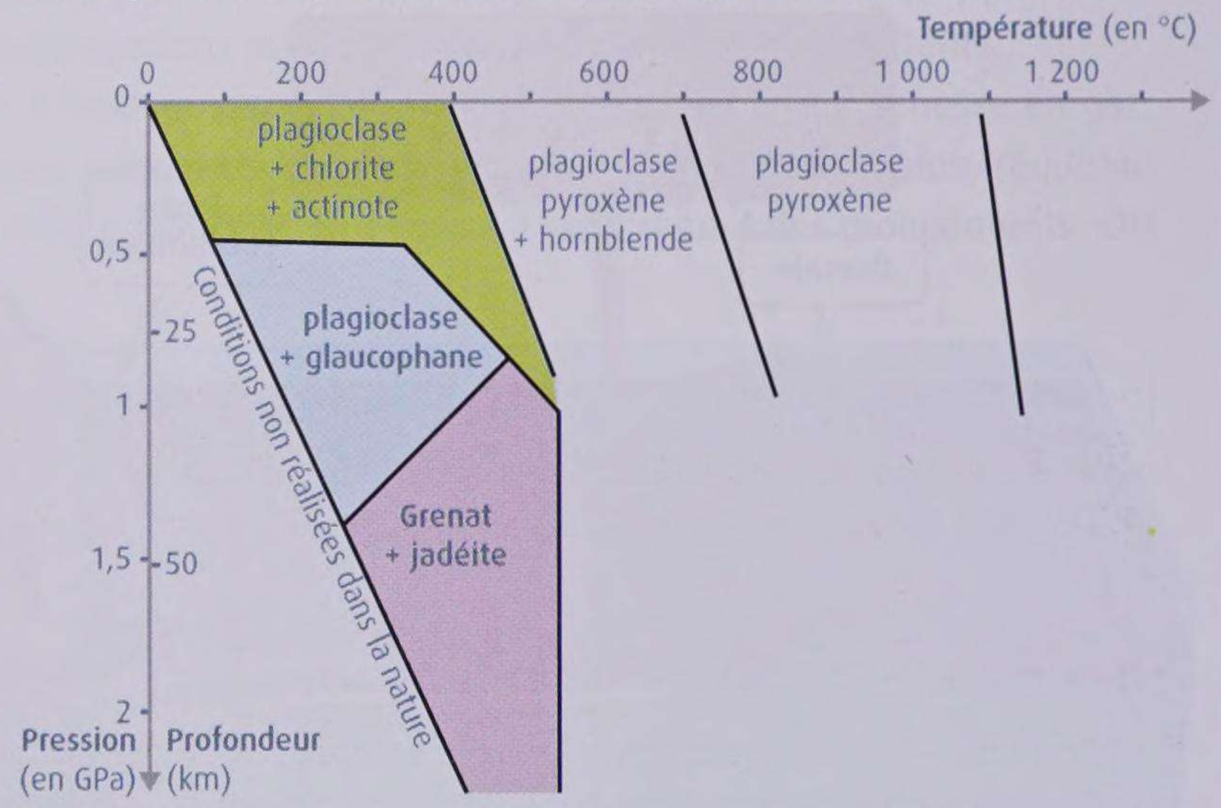
d. correspondent à des roches de type granite et granitoïdes présentes en grande quantité.

2 Un graphique à compléter

Placez les roches suivantes dans leur domaine de stabilité respectif :

- un gabbro (G1)
- un métagabbro du domaine schiste vert (M2)
- un métagabbro du domaine schiste bleu (M3)
- une éclogite (M4)

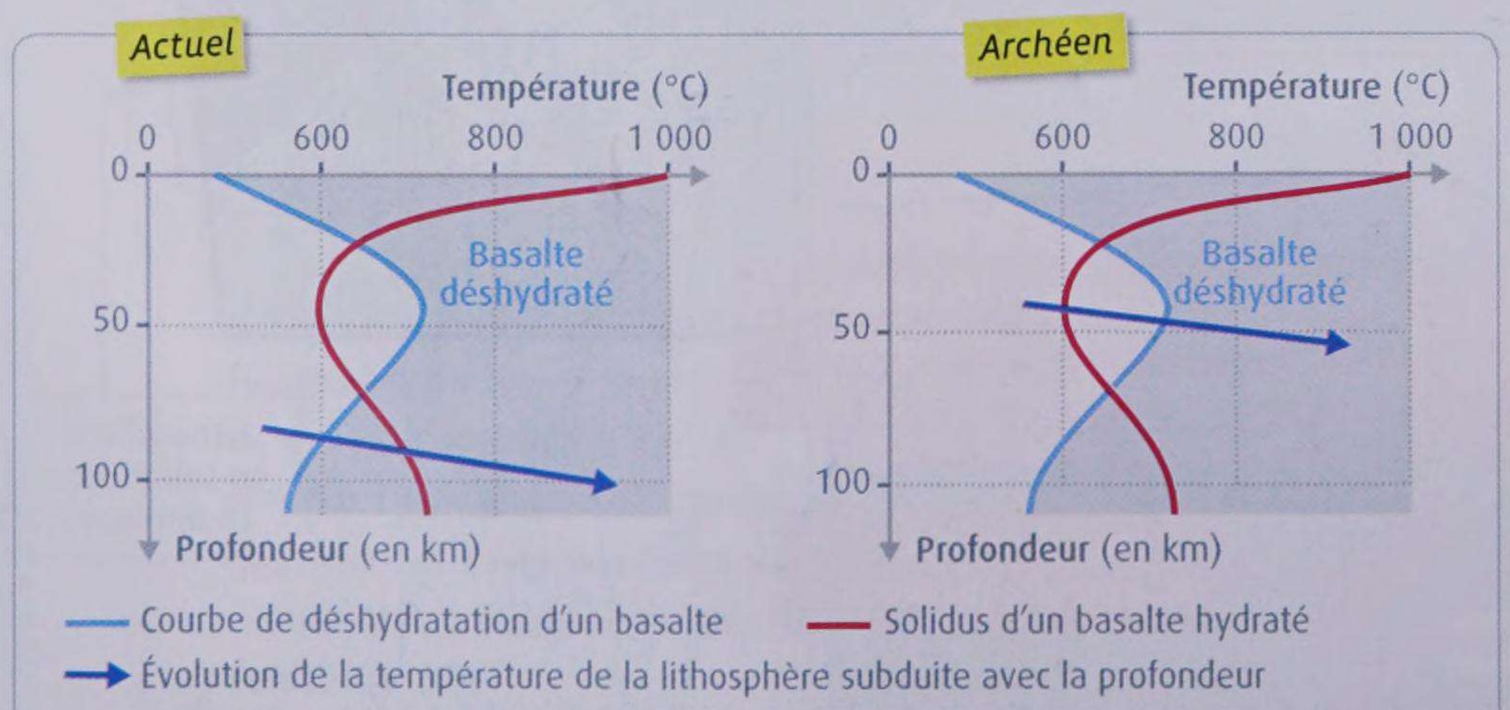
Reliez ces différentes roches par une flèche illustrant l'histoire d'un gabbro depuis sa formation jusqu'à la subduction.



s'entraîner avec un exercice guidé

3 La fabrication de croûte continentale archéenne

C'est dans les zones de subduction que se fabrique actuellement l'essentiel de la croûte continentale par fusion partielle des roches du manteau. Les plus vieilles roches de la croûte continentale, datant de l'Archéen (– 4 Ga à – 2,5 Ga), présentent des compositions chimiques différentes de celles que l'on connaît depuis environ 2,5 Ga. Pour expliquer ces différences, certains géologues émettent l'hypothèse que le matériau source de ces roches est différent du matériau source des roches formées dans les zones de subduction actuelle.



1. Conditions de fusion partielle d'un basalte hydraté et conditions P/T au niveau d'une zone de subduction à l'Archéen et actuellement.

QUESTION À partir de l'exploitation des informations fournies par le document, discutez de la pertinence de l'hypothèse des géologues.

Un peu d'aide

• Énoncer une hypothèse

Identifiez le ou les matériau(x) présent(s) dans une zone de subduction et dont la fusion partielle pourrait être à l'origine d'un magma différent de celui des zones de subduction actuelles.

• Saisir des informations

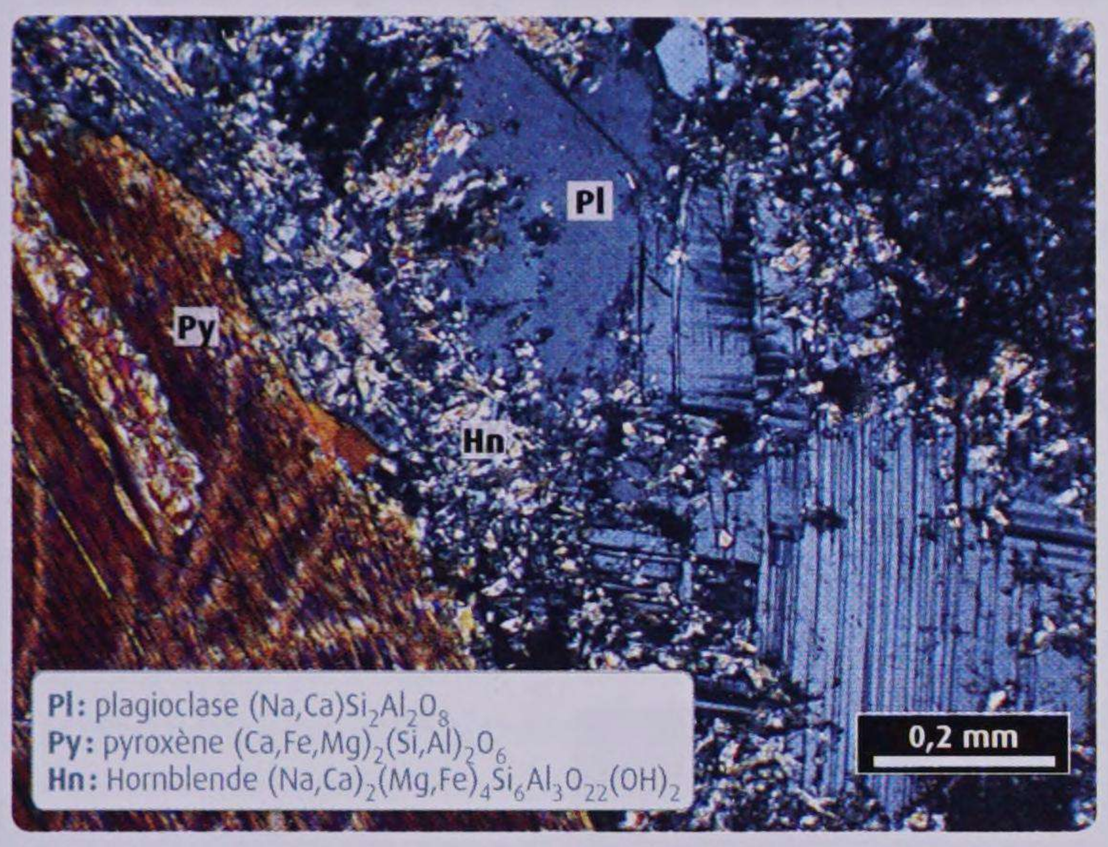
– Identifiez sur le graphique fourni les conditions de pression, température et hydratation qui permettent une fusion partielle expérimentale d'un basalte.

– Confrontez ces conditions avec celles rencontrées dans une zone de subduction actuelle et dans une zone de subduction à l'Archéen.

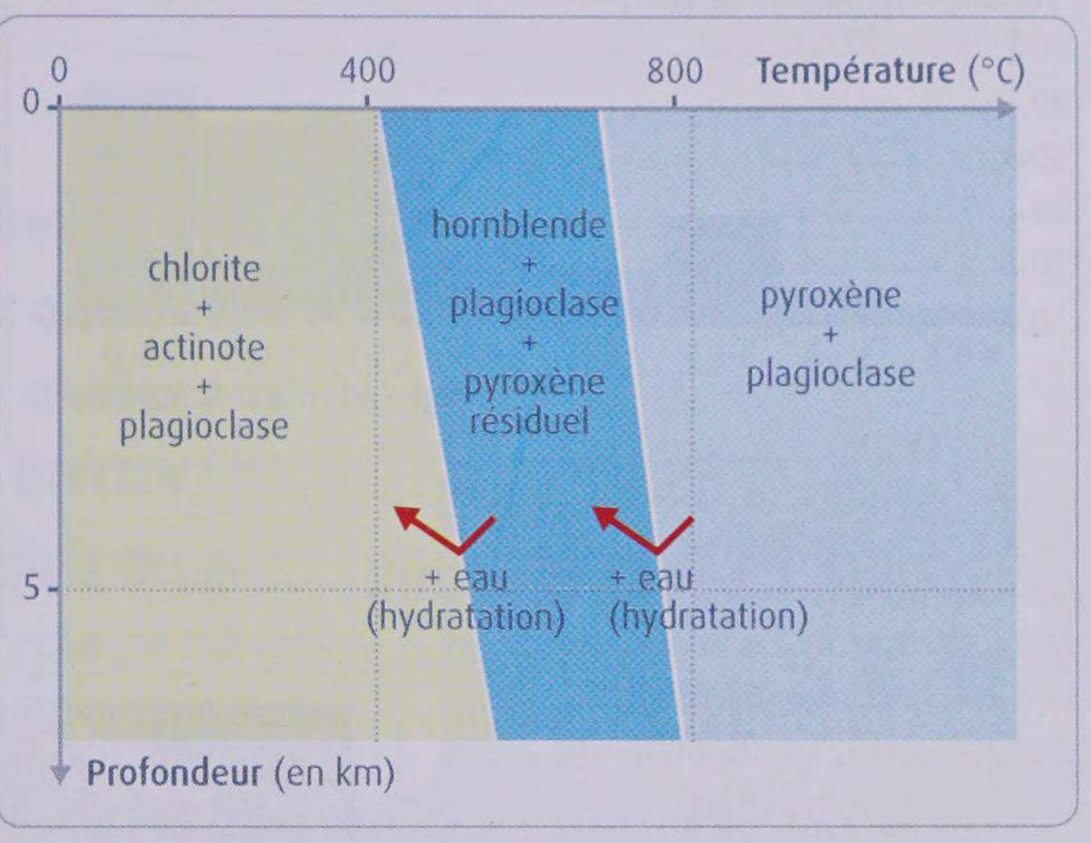
4 Les informations fournies par un métagabbro

Mettre en relation des informations

Les minéraux des roches métamorphiques permettent de reconstituer les conditions dans lesquelles ces roches se sont formées. Un échantillon de métagabbro a été prélevé dans une ophiolite des Alpes. Il a la même composition chimique qu'un gabbro. On rappelle qu'un gabbro est constitué de plagioclases et pyroxènes.



1. Photographie de la lame mince du métagabbro observé en LPA.



2. Domaines de stabilité de trois associations minéralogiques.

❶ Déterminez les conditions de stabilité du métagabbro présenté

❷ Utilisez vos connaissances pour expliquer comment le métamorphisme à l'origine des métagabbros à hornblende contribue à la formation des magmas dans une zone de subduction.

5 Les conditions de formation des adakites

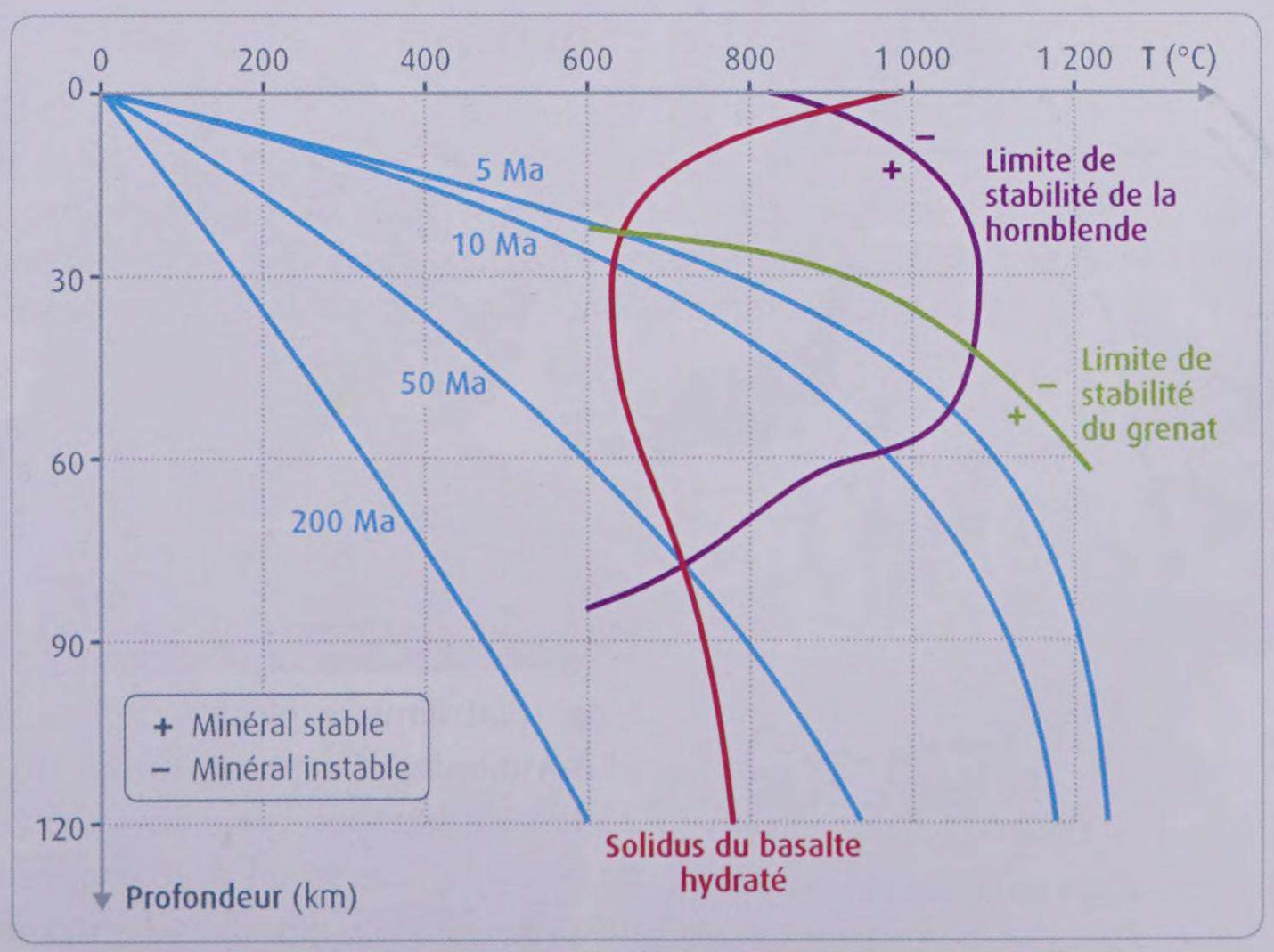
Mettre en relation des informations

Les adakites sont des roches volcaniques particulières échantillonnées dans certaines zones de subduction, pour lesquelles la plaque plongeante est très jeune (moins de 20 Ma). Elles diffèrent des andésites par leur composition, ce qui suggère un matériau source différent.

❶ Sur le doc. 1, identifiez la zone de pression-température qui permet la fusion partielle d'une croûte océanique.

❷ Sur le doc. 1, identifiez la zone dans laquelle la fusion partielle peut produire un magma de composition adakitique, en tenant compte des domaines de stabilité de la hornblende et du grenat.

❸ Montrez que seule la subduction d'une jeune croûte océanique permet la genèse d'adakites.



1. Conditions expérimentales de fusion partielle d'un basalte hydraté et évolution de la température de la lithosphère plongeante avec la profondeur en fonction de son âge au niveau de la zone de subduction. Les courbes bleues représentent l'évolution de la température de quatre lithosphères d'âge différent. Pour obtenir un magma de composition adakitique, les expériences montrent que la roche qui subit la fusion partielle doit contenir de la hornblende et du grenat.

Appliquer ses connaissances

6 La croissance des continents

Analyser un graphique

1. Rappelez quel est le contexte privilégié de fabrication de croûte continentale.

2. A partir des informations issues de l'analyse du graphique fourni, indiquez si la croissance des continents a été régulière au cours des temps géologiques et proposez une ou des explication(s) à ce constat.

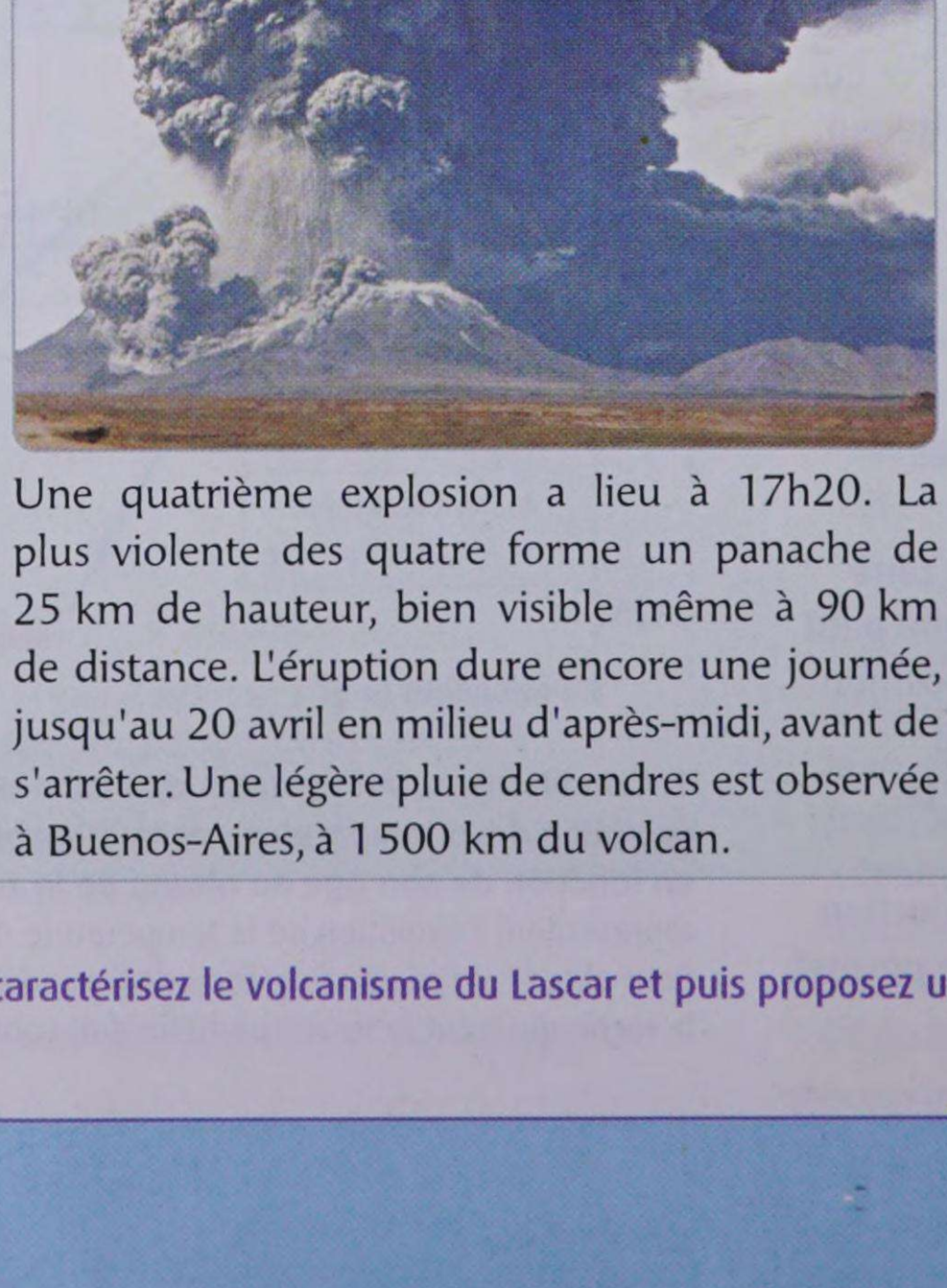
1. Surface de croûte continentale en fonction de son âge.

7 Le volcan Lascar au Chili

Mettre en relation des données et des connaissances

Le Lascar (5 592 m) est l'un des volcans les plus actifs de la région Nord du Chili. Il a connu de nombreuses éruptions au cours de son histoire. La plus importante des temps historiques a eu lieu en 1993.

1. Localisation du volcan Lascar.



2. L'éruption du 19 avril 1993.

Une quatrième explosion a lieu à 17h20. La plus violente des quatre forme un panache de 25 km de hauteur, bien visible même à 90 km de distance. L'éruption dure encore une journée, jusqu'au 20 avril en milieu d'après-midi, avant de s'arrêter. Une légère pluie de cendres est observée à Buenos-Aires, à 1 500 km du volcan.

SiO_2	59,51
TiO_2	0,76
Al_2O_3	16,74
Fe_2O_3+FeO	6,39
MnO	0,10
MgO	3,68
CaO	6,41
Na_2O	3,42
K_2O	1,79
P_2O_5	0,22
H_2O+CO_2	0,51
Total	**99,53**

- Teneur en silice (SiO_2) d'un basalte du point chaud d'Hawaii : 47,3 %
- Teneur en silice d'un basalte de dorsale : comprise entre 48 et 54 %
- Teneur en silice d'une andésite : entre 57 et 63 %

3. Analyse chimique des cendres du volcan (% massique).

J. et A. Guarinos, Archives des sciences, Genève, vol. 46-3, 303-319 (1993).

A l'aide des différents documents, caractérisez le volcanisme du Lascar et puis proposez une explication à l'origine de ce volcanisme.

CHAPITRE 4

La disparition des reliefs

Des vestiges d'anciennes chaînes de montagnes datant de plusieurs centaines de millions d'années sont observables sur tous les continents. L'étude comparée des chaînes de montagnes actuelles et anciennes permet de mettre en lumière les processus responsables de la disparition des reliefs et de comprendre les modalités du recyclage de la lithosphère continentale.

Image satellite du massif du Bhoutan (chaîne de l'Himalaya-Tibet) montrant des langues glaciaires.

Quels processus entraînent la disparition des chaînes de montagnes et que deviennent les produits de leur démantèlement ?

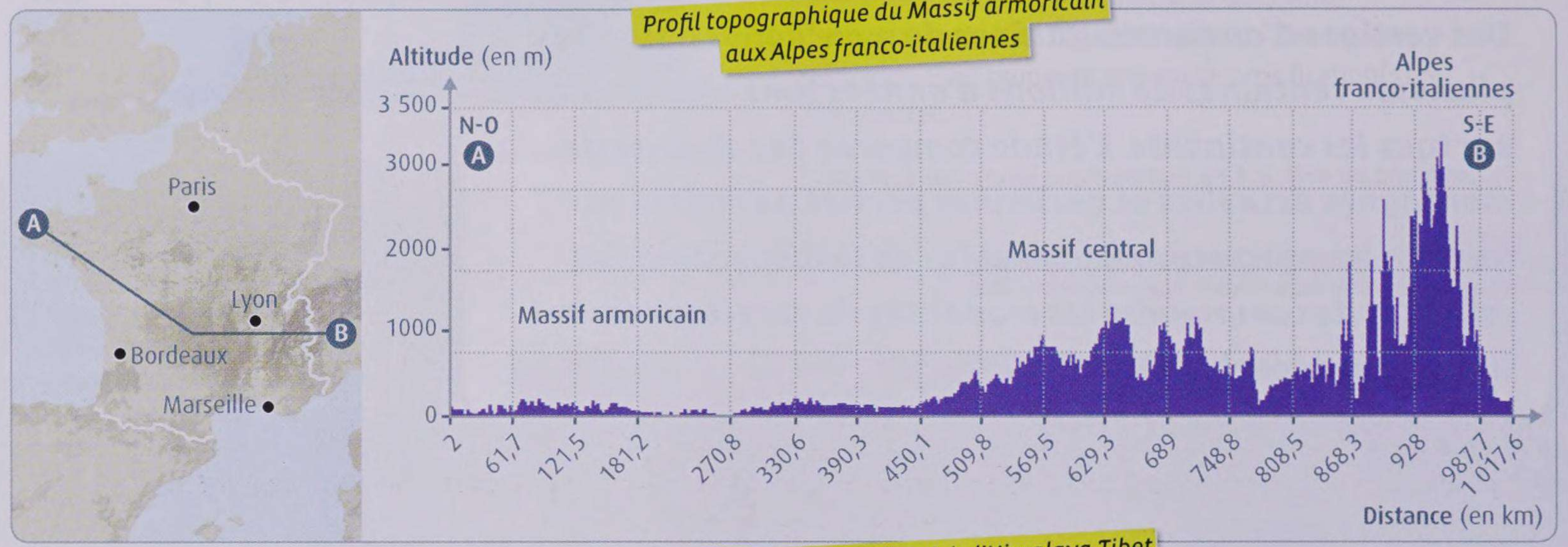
UNITÉ 1

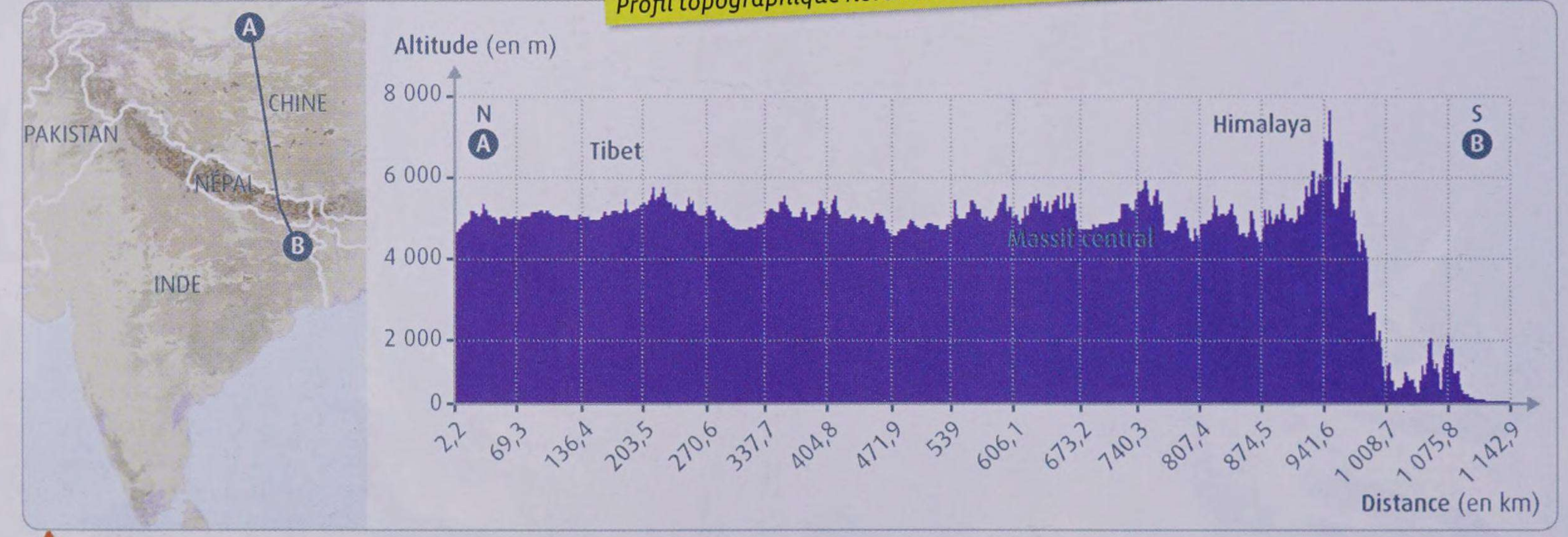
L'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes

Les chaînes de montagnes paraissent immuables à l'échelle humaine. Pourtant, leurs caractéristiques changent à l'échelle des temps géologiques.

Comment les caractéristiques des chaînes de montagnes évoluent-elles ?

La topographie de quelques chaînes de montagnes





1 Profil topographique de quelques chaînes de montagnes actuelles : Massif armoricain, Massif central, Alpes franco-italiennes, chaîne Himalaya-Tibet. Du Dévonien au Permien (– 416 à – 250 Ma), la fermeture de l'océan Rhéique est suivie d'intenses phases de collision continentale. La chaîne hercynienne s'érige alors sur plusieurs milliers de kilomètres à des altitudes supérieures à 5 000 m. Le Massif armoricain et le Massif central appartiennent à cette chaîne de montagnes. Au Cénozoïque (– 65 Ma à l'actuel), de nombreuses phases de collision font suite à la fermeture de l'océan Thétys et s'étendent du territoire actuel de la France à l'Asie. Des chaînes de montagnes telles que les Alpes franco-italiennes ou l'Himalaya-Tibet s'érigent. Les forces de collision sont telles qu'elles peuvent modifier les reliefs situés aux abords des chaînes de montagnes en formation.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Comparez les altitudes actuelles des chaînes anciennes et récentes présentées. Formulez une hypothèse pour expliquer la différence d'altitude entre le Massif central et le Massif armoricain.

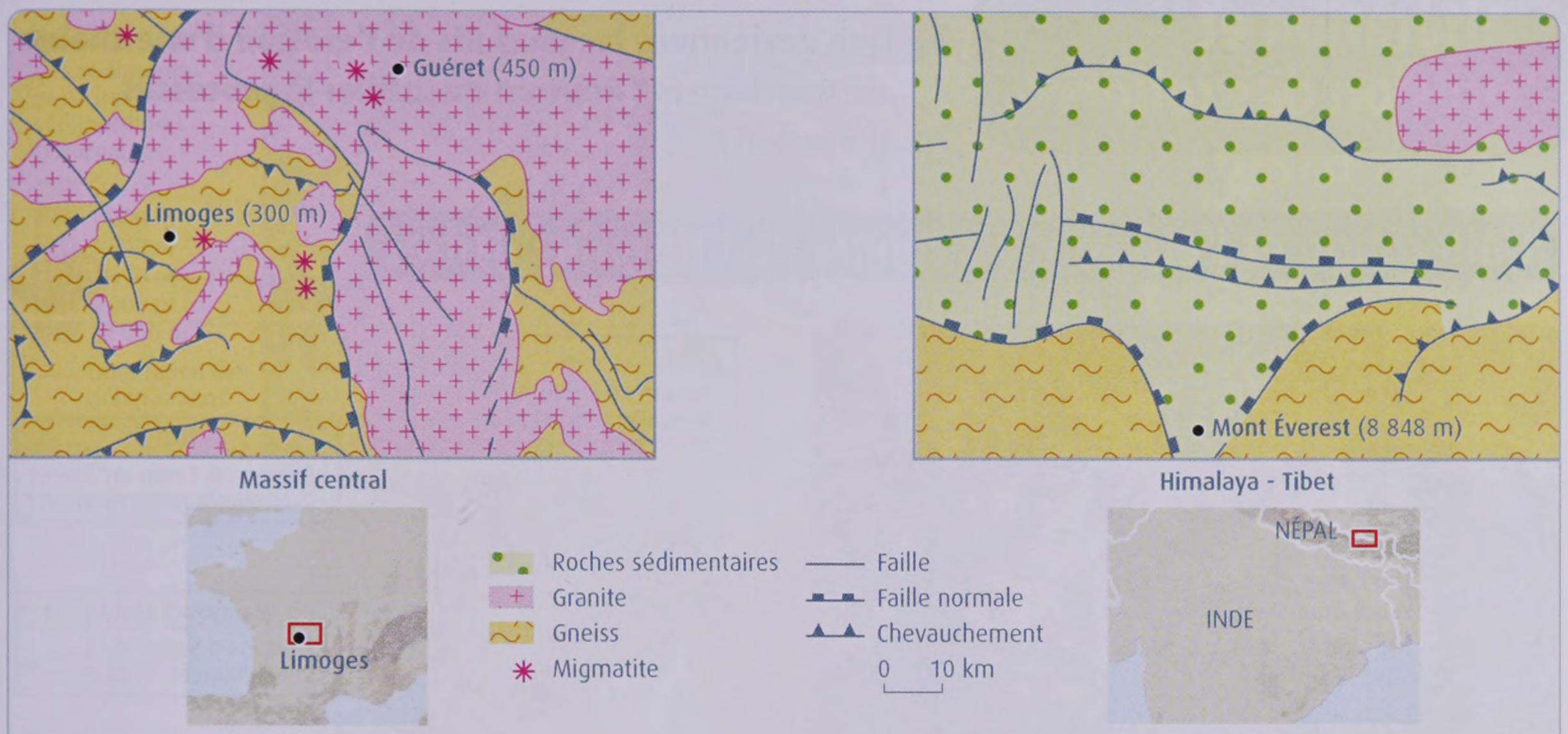
2 **DOC. 2.** Comparez les types de roches majoritairement à l'affleurement dans les deux massifs étudiés.

3 **DOC. 3.** À l'aide de la modélisation, expliquez le devenir du relief et de la racine crustale au cours de l'évolution d'une chaîne de montagnes. Proposez alors une explication aux différences observées doc. 2.

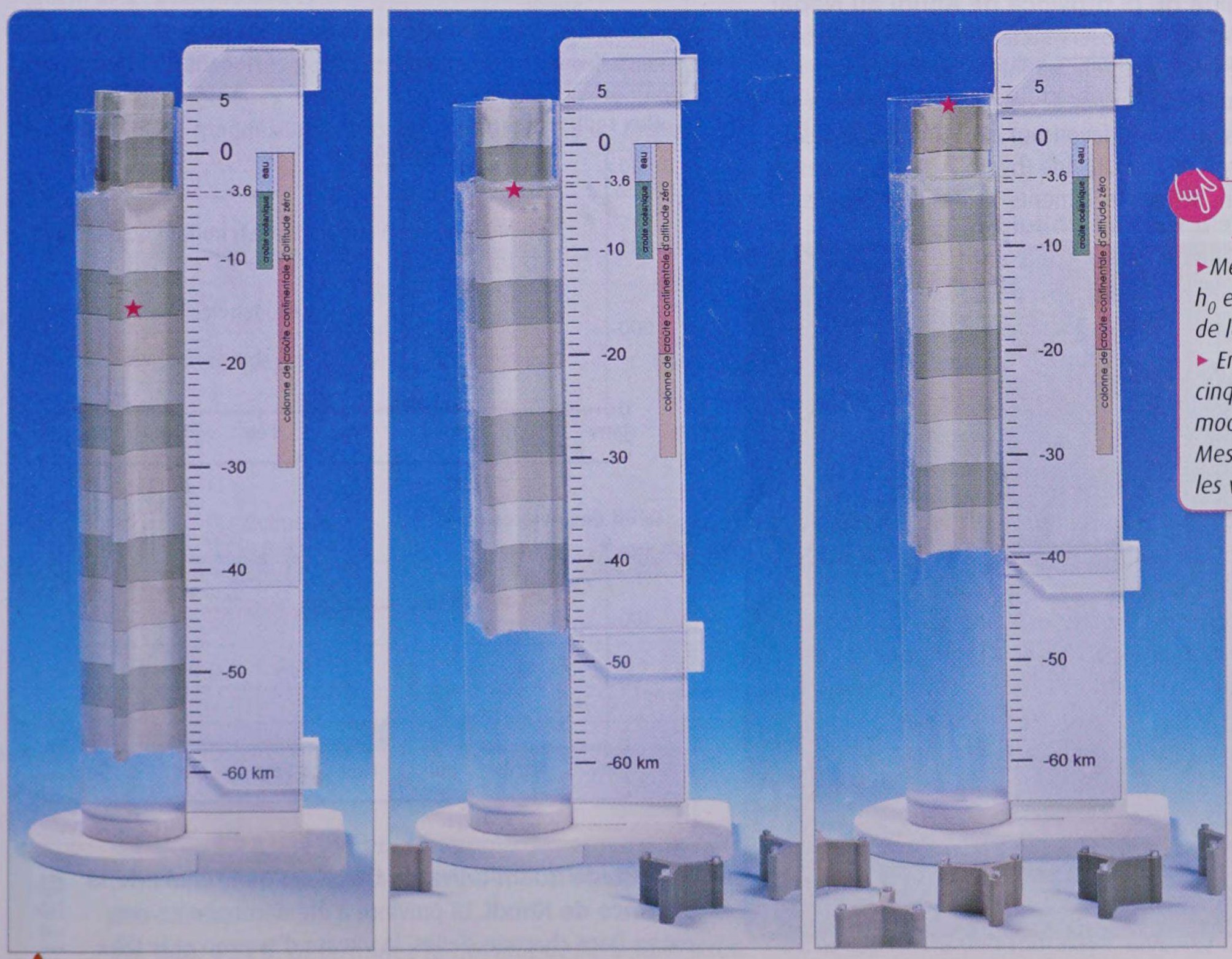
4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez l'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes à l'échelle des temps géologiques.

Les roches à l'affleurement dans quelques chaînes de montagnes

PISTE



2 Cartes géologiques simplifiées d'une partie du Massif central et d'une partie de l'Himalaya-Tibet (haut Himalaya sédimentaire). Les deux zones étudiées ont la même superficie.



JE MANIPULE

▸ Mesurez l'altitude initiale h_0 et la hauteur initiale r_0 de la racine crustale.

▸ Enlevez successivement cinq éléments du bloc modélisant la croûte. Mesurez à chaque étape les valeurs de h et r.

3 Un modèle analogique d'évolution d'une chaîne de montagnes. On modélise l'érosion d'une colonne de croûte continentale en équilibre isostatique sur le manteau. La croûte continentale est modélisée par un bloc de plastique prédécoupé en plusieurs éléments et le manteau par un liquide. Le rapport entre la densité du bloc et celle du liquide est le même qu'entre croûte continentale et manteau.

UNITÉ 2

Altération et érosion des reliefs

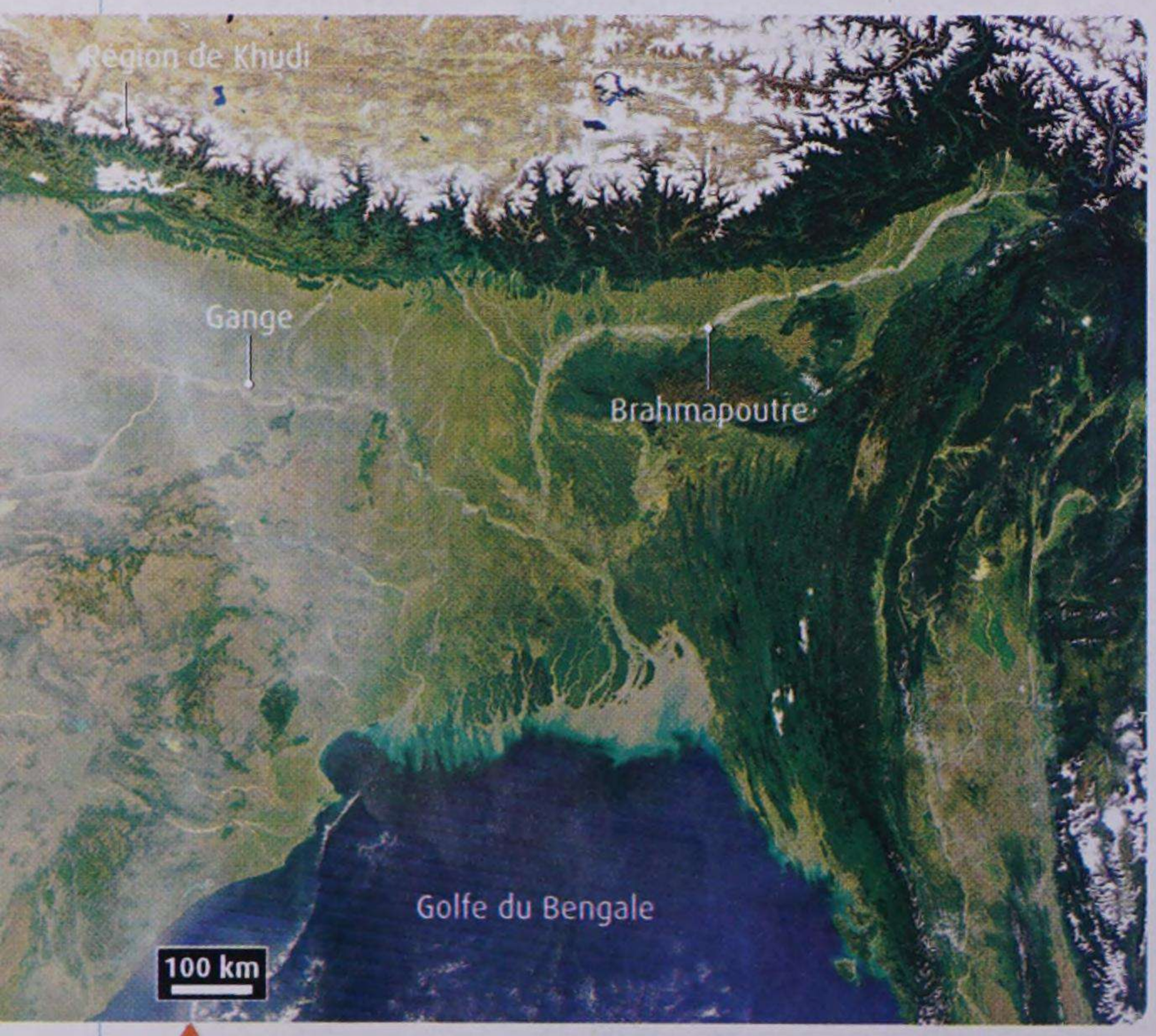
Les reliefs des chaînes de montagnes récentes sont voués à disparaître. Altération et érosion contribuent au démantèlement et à la disparition des reliefs.

Que deviennent les produits de l'érosion d'une chaîne de montagnes ? Peut-on quantifier le processus d'érosion ?

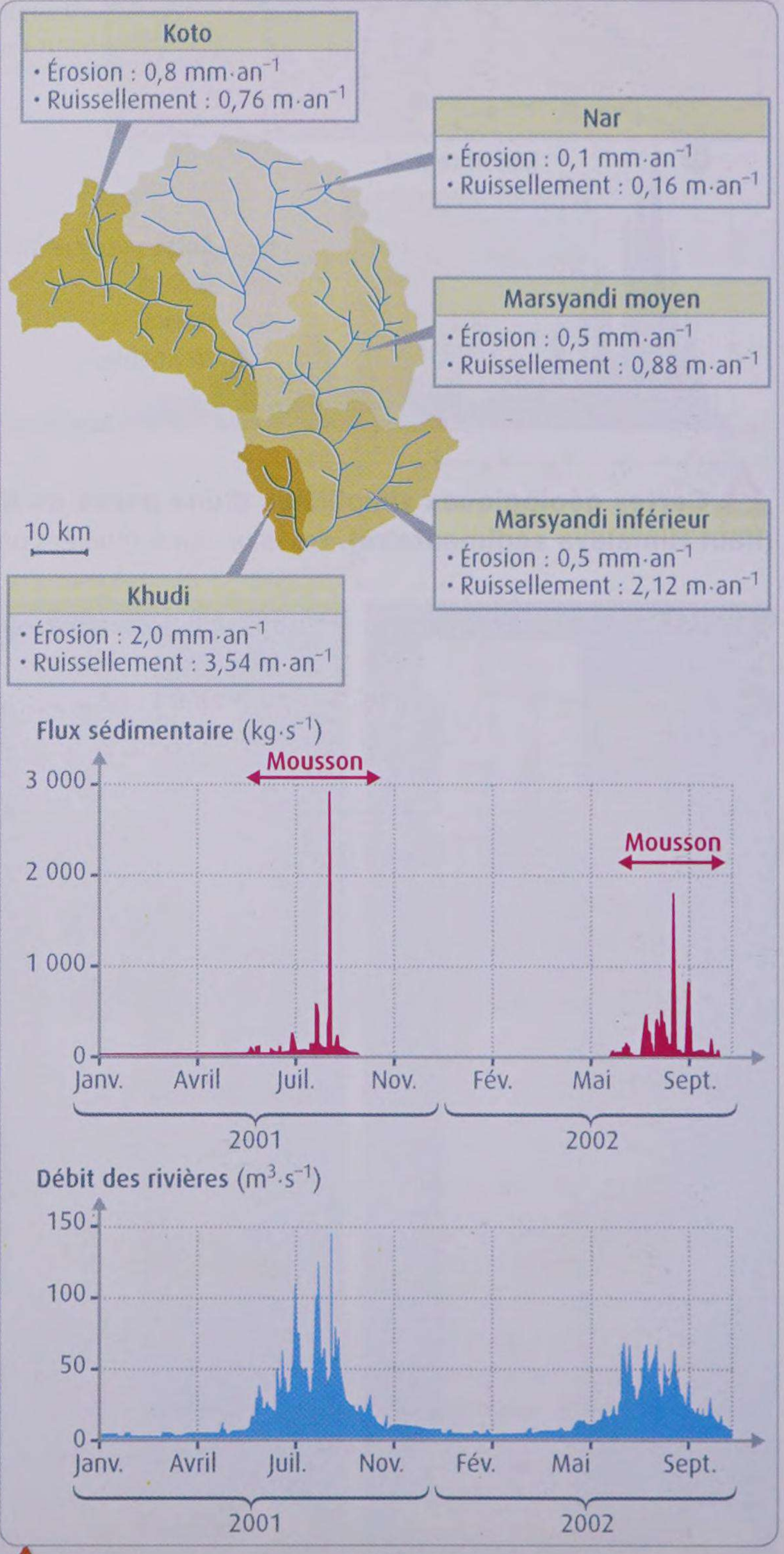
L'altération et l'érosion des reliefs de l'Himalaya-Tibet

PISTE

1 Image satellite de la province de Khudi au Népal (localisation : voir doc. 2). On observe une succession d'arêtes qui culminent à plus de 8 000 m et encadrent de profondes vallées. Les plus élevées sont occupées par des glaciers. Ces derniers réduisent les roches en débris, favorisant ainsi l'altération des minéraux sous l'action de l'eau liquide (hydrolyse). Ces processus produisent des débris solides (sédiments) et des ions dissous.



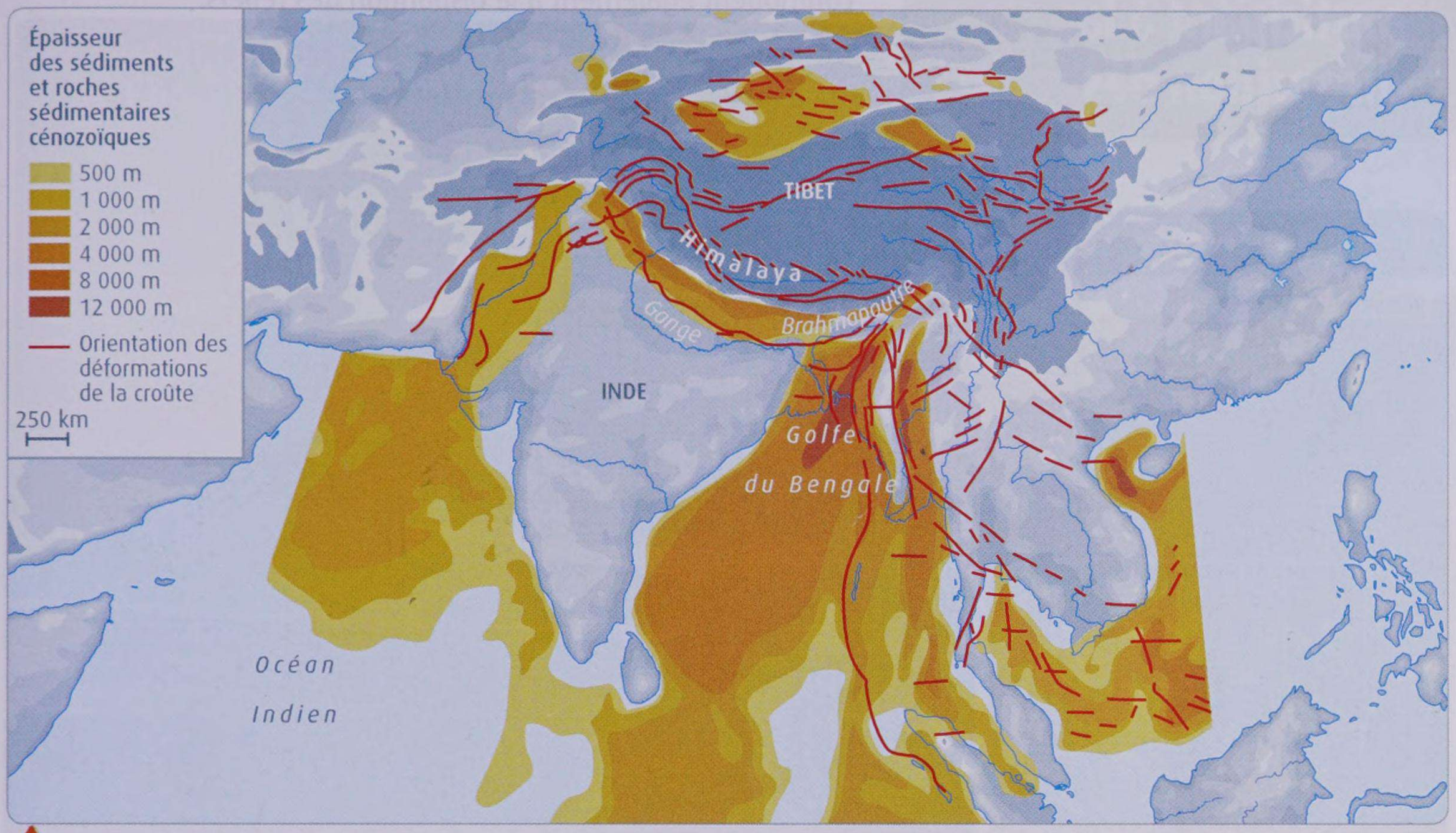
2 Image satellite du golfe du Bengale (localisation : voir doc. 4). Les fleuves Gange et Brahmapoutre dispersent chaque année plus d'un milliard de tonnes de sédiments dans l'océan Indien.



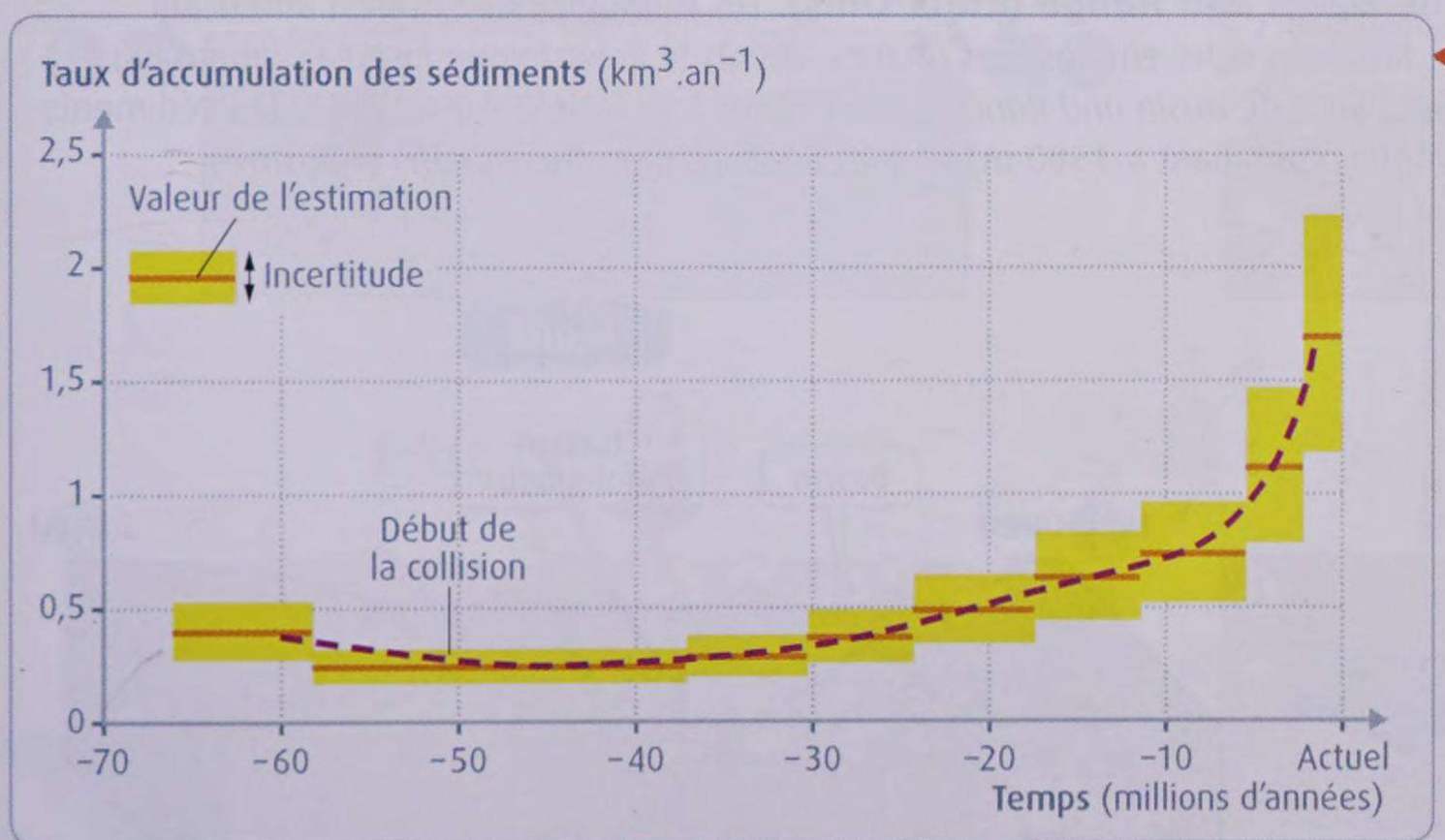
3 Étude quantitative de l'érosion des reliefs de la province de Khudi. La province a été découpée en cinq zones. Dans chacune d'elles, la vitesse d'érosion et le taux de ruissellement (quantité d'eau ruisselant annuellement sur l'ensemble de la zone considérée) ont été quantifiés. Dans la zone de Khudi, des mesures du débit des rivières et du flux de sédiments qu'elles transportent ont été faites pendant deux ans.

Le devenir des produits du démantèlement de l'Himalaya-Tibet

PISTE



4 Carte des bassins sédimentaires cénozoïques (de – 65 Ma à l'actuel) associés à l'Himalaya-Tibet.
Les sédiments transportés par le réseau hydrographique s'accumulent dans ces bassins. Après consolidation, ils forment des roches sédimentaires détritiques. Les ions transportés par le réseau hydrographique précipitent sous forme de carbonates (essentiellement de calcium et de magnésium), formant d'autres types de roches sédimentaires (calcaires).



5 Évolution du taux d'accumulation des sédiments dans les bassins associés à la chaîne Himalaya-Tibet depuis 65 Ma. La superficie de cette chaîne est estimée à 5 000 000 km².

Vocabulaire

Altération : Modification chimique et physique d'une roche sous l'action d'un agent naturel de surface comme l'eau.
Érosion : Ensemble des phénomènes qui altèrent, enlèvent les débri et particules issus de l'altération et modifient le relief.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Présentez l'ensemble des arguments prouvant que l'eau est un agent d'altération et d'érosion des reliefs.

2 **DOC. 4 ET 5.** Déterminez le devenir des produits issus du démantèlement des reliefs himalayens et montrez que l'érosion débute dès la naissance du relief.

3 **DOC 5.** Estimez, en mm.an^{-1}, la vitesse d'érosion moyenne sur les 20 derniers millions d'années. Pour cela, en considérant un taux moyen d'accumulation, calculez le volume global de sédiments accumulés sur cette période. Puis, en utilisant l'estimation de la superficie de l'Himalaya, calculez la vitesse moyenne d'érosion. Commentez et critiquez votre résultat.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez quelques caractéristiques de l'érosion de l'Himalaya-Tibet.

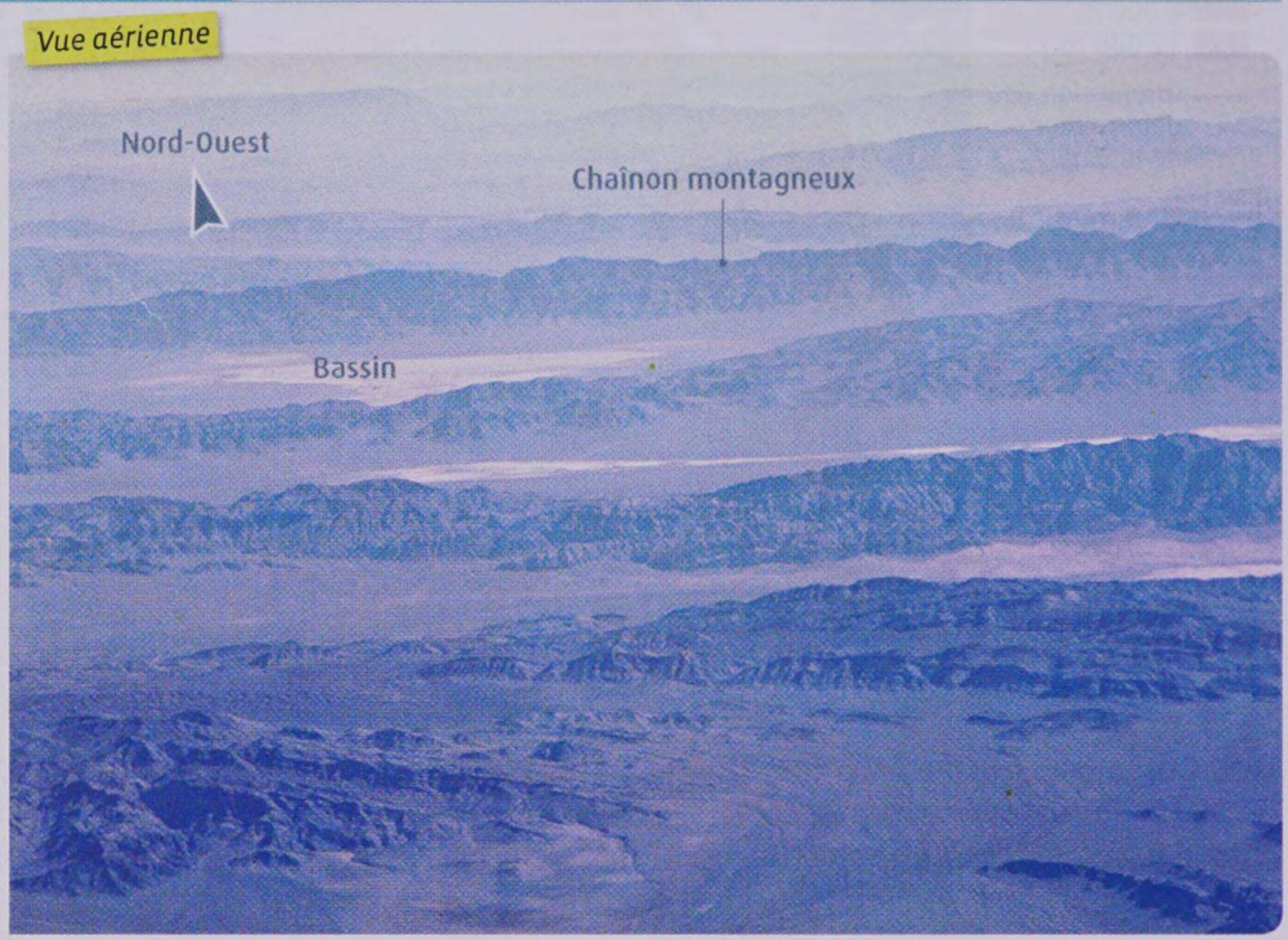
UNITÉ 3

Des processus tectoniques participant à la disparition des reliefs

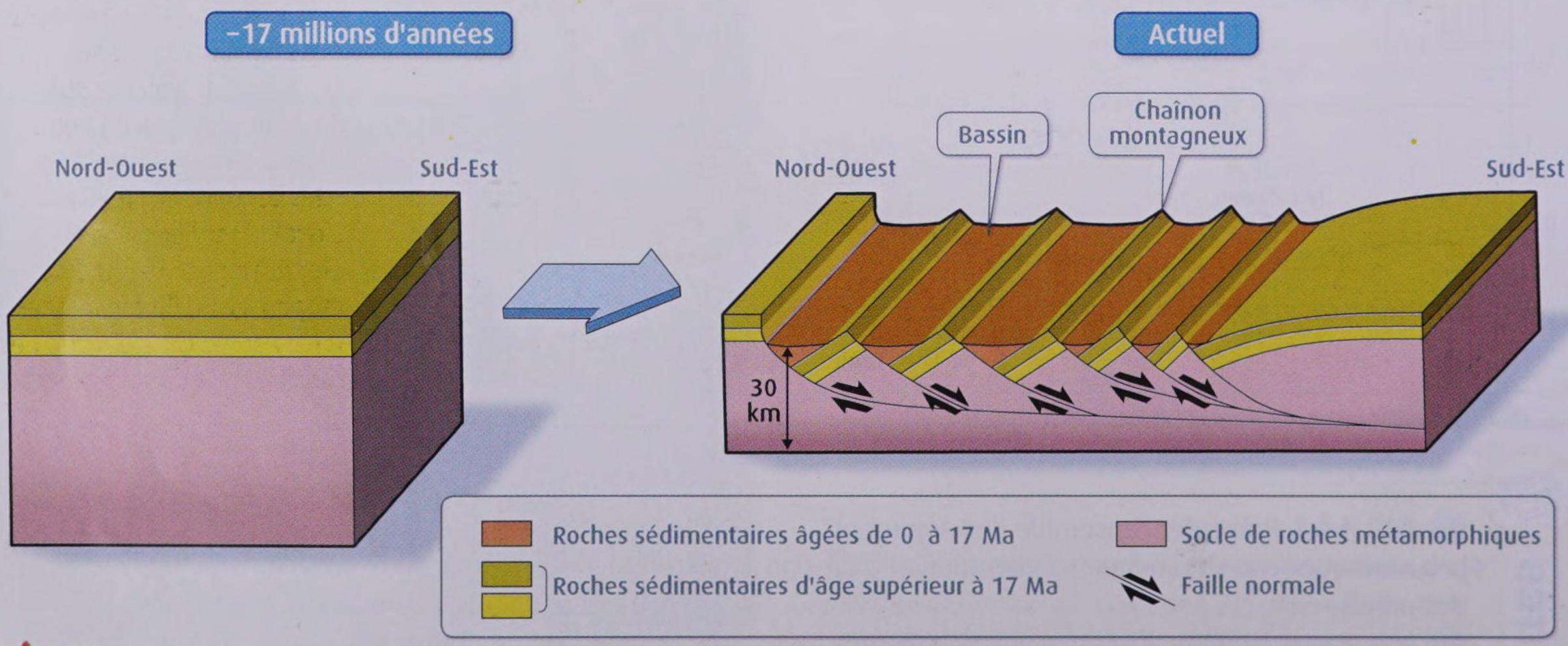
Les reliefs montagneux sont soumis à l'érosion dès le début de leur formation. D'autres processus, de nature tectonique, contribuent également à la disparition des reliefs.

Quels processus tectoniques participent à la disparition des reliefs ?

L'étude de données de terrain

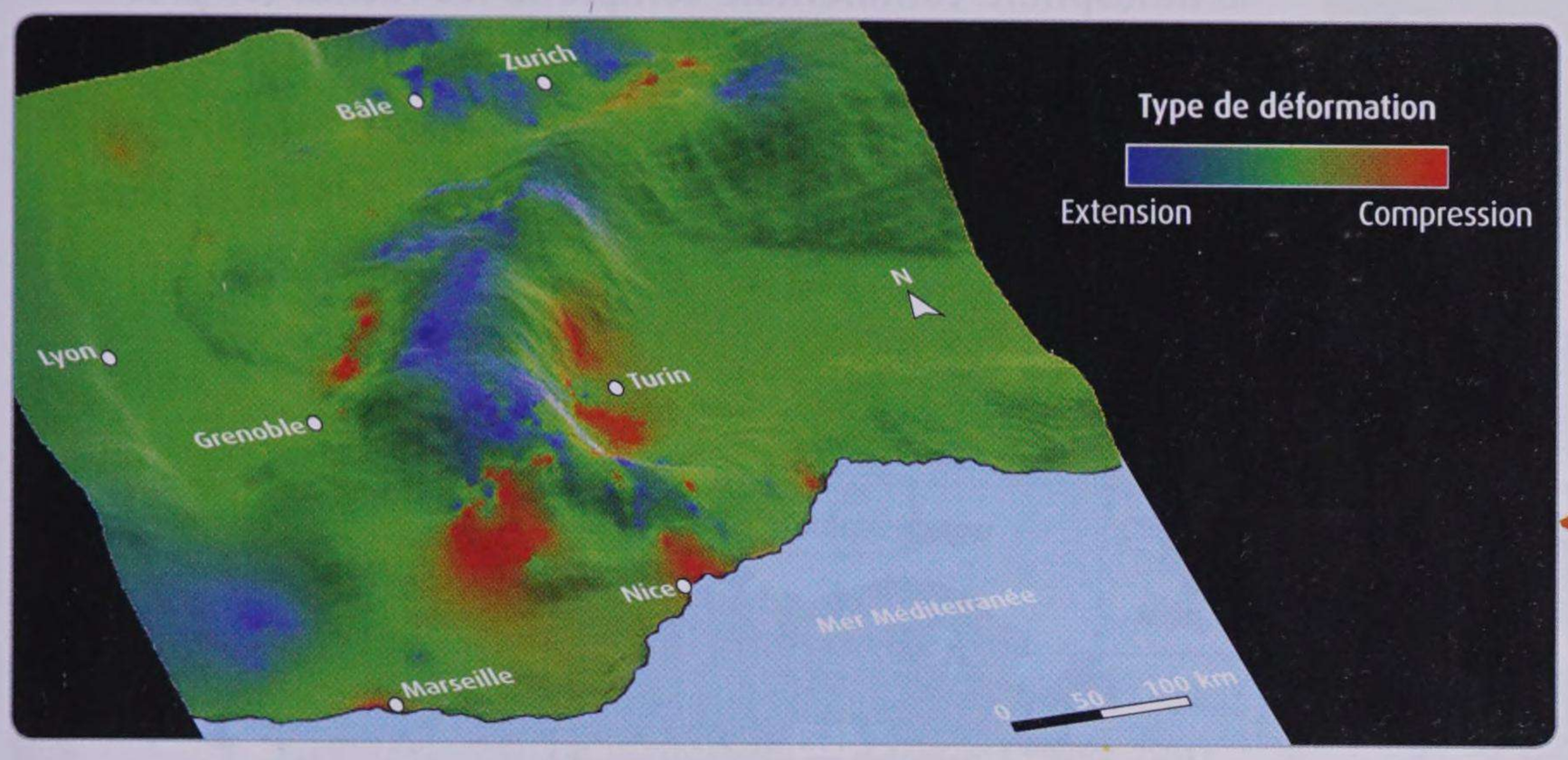


1 Les caractéristiques de la province de *Basin and Range* (États-Unis). Les montagnes de l'Ouest américain se sont érigées dans un contexte de convergence lithosphérique en plusieurs phases, depuis le Paléozoïque jusqu'à aujourd'hui. La topographie actuellement observable dans la province de *Basin and Range* a commencé à se former il y a 17 Ma. Les sédiments issus de l'érosion de chaînons montagneux (« *Range* », culminant à 3 500 m) se sont déposés dans des bassins (« *Basin* »).

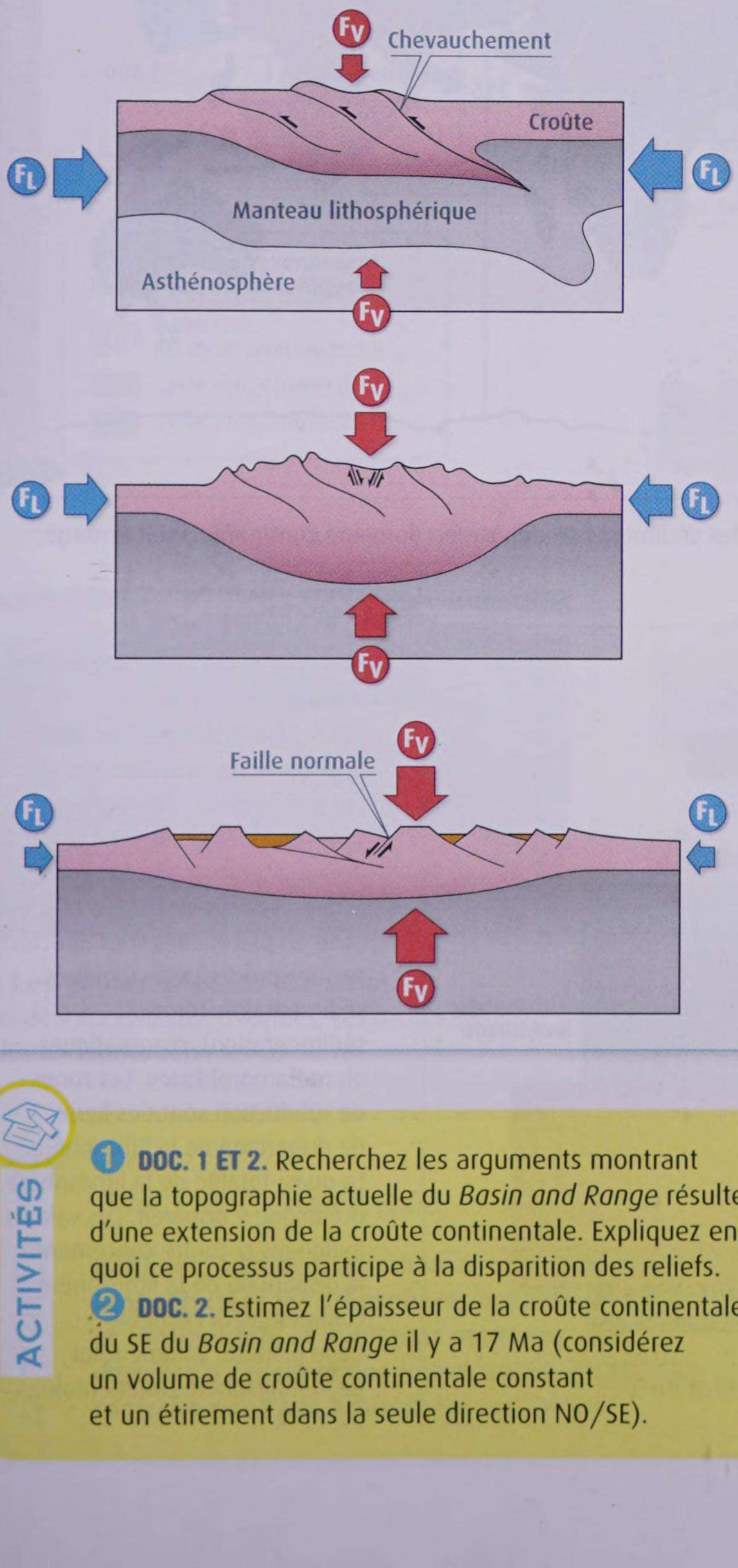


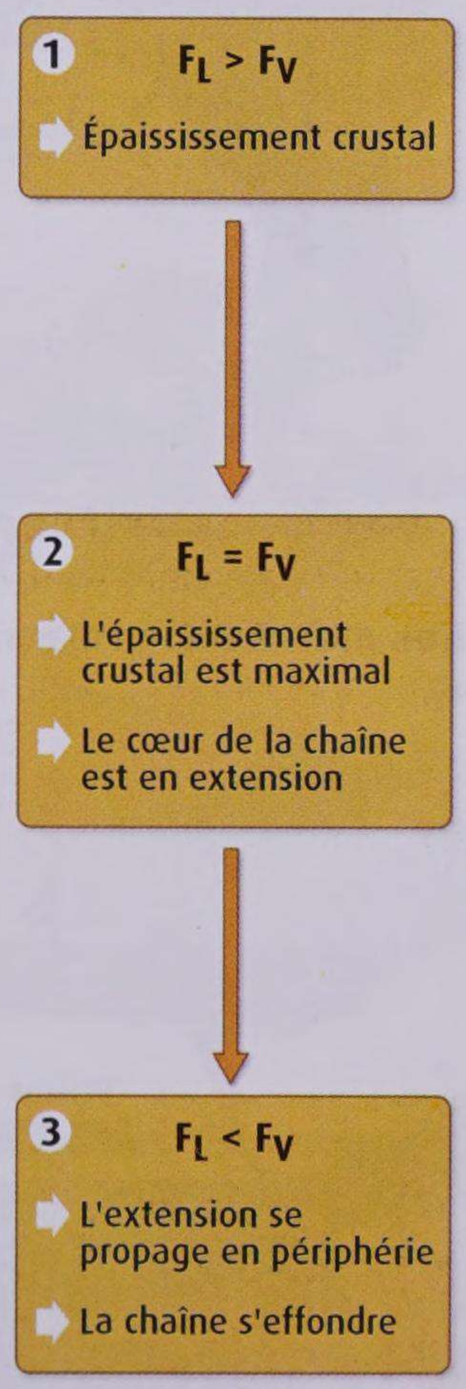
2 Représentation schématique de la formation de la province de *Basin and Range* depuis 17 Ma.
La province de *Basin and Range* résulte de l'effondrement des reliefs de l'Ouest américain. Depuis 17 Ma, dans le secteur sud-est du *Basin and Range* (longueur Nord-Ouest/Sud-Est [NO-SE] actuelle : 500 km), la croûte s'est étirée de 100 % selon un axe NO/SE et son épaisseur a été réduite à 30 km. L'amincissement et l'étirement de la croûte ont conduit à une extension globale de la région.

Les stades d'évolution d'une chaîne de montagnes



3 Carte des déformations actuelles dans les Alpes. Les vitesses de déformation sont de l'ordre de 2 mm.an^{-1} (+/– 0,5 mm.an^{-1}).





4 Un modèle d'évolution d'une chaîne de montagnes. Le mouvement de convergence des plaques engendre des forces compressives horizontales sur les roches (forces aux limites de plaques F_L) qui tendent à créer un relief et une racine crustale. Dans le même temps, les roches sont soumises à des forces verticales (forces de volume F_V) liées au poids des reliefs et à la poussée d'Archimède s'exerçant sur la racine.
Les forces de volume sont d'autant plus intenses que la croûte est épaisse et elles tendent à l'amincir.
L'évolution d'une chaîne de montagnes dépend du rapport entre l'intensité des forces de volume et celle des forces aux limites de plaques.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Recherchez les arguments montrant que la topographie actuelle du *Basin and Range* résulte d'une extension de la croûte continentale. Expliquez en quoi ce processus participe à la disparition des reliefs.

2 **DOC. 2.** Estimez l'épaisseur de la croûte continentale du SE du *Basin and Range* il y a 17 Ma (considérez un volume de croûte continentale constant et un étirement dans la seule direction NO/SE).

3 **DOC. 3.** Décrivez la répartition des déformations dans les Alpes.

4 **DOC. 1, 3 ET 4.** Expliquez les différents stades d'évolution d'une chaîne de montagnes puis identifiez le stade d'évolution des Alpes et du *Basin and Range*.

5 **EN CONCLUSION.** Expliquez comment les processus tectoniques participent à la disparition des reliefs.

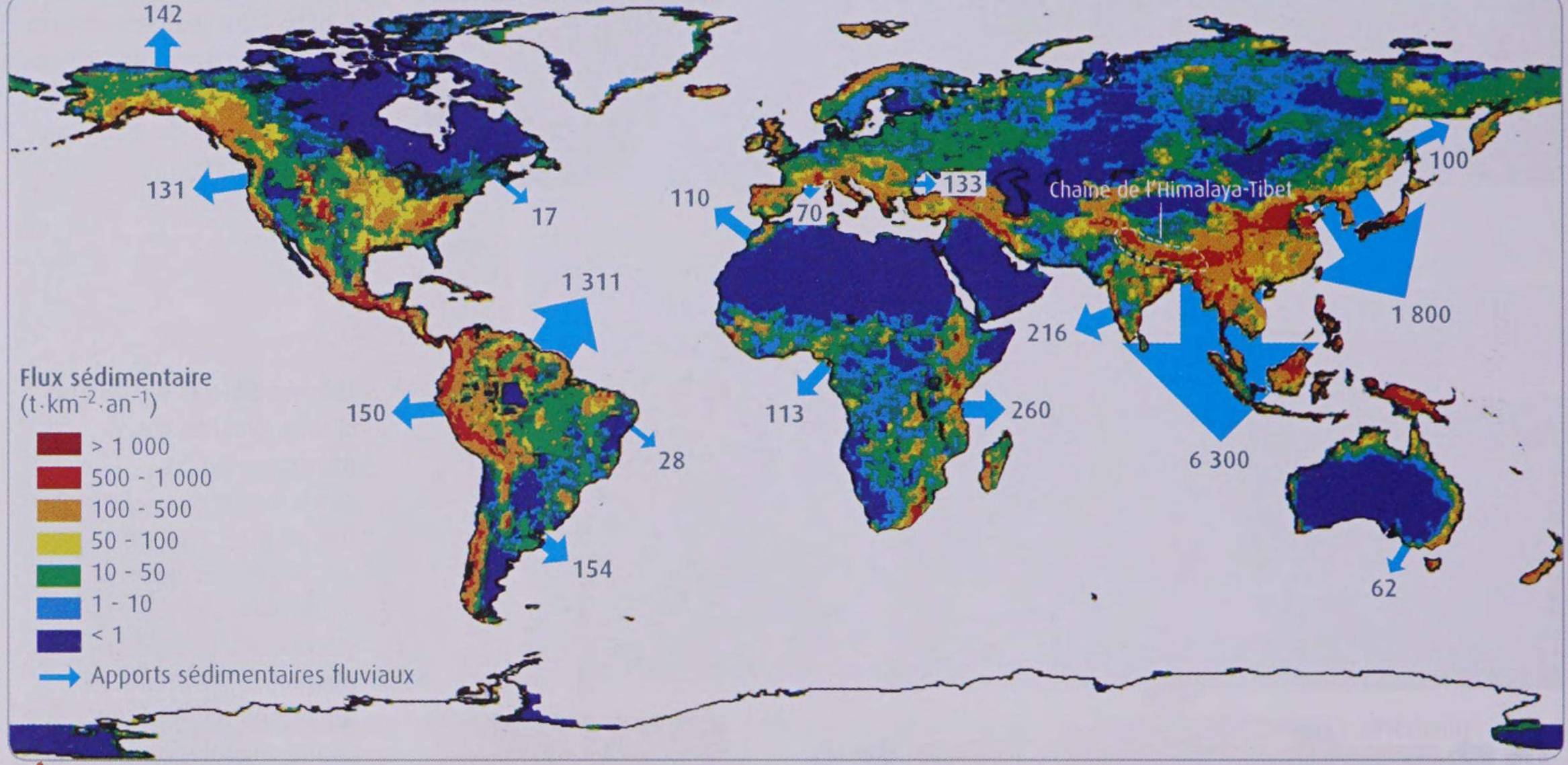
UNITÉ 4

Le recyclage de la lithosphère continentale

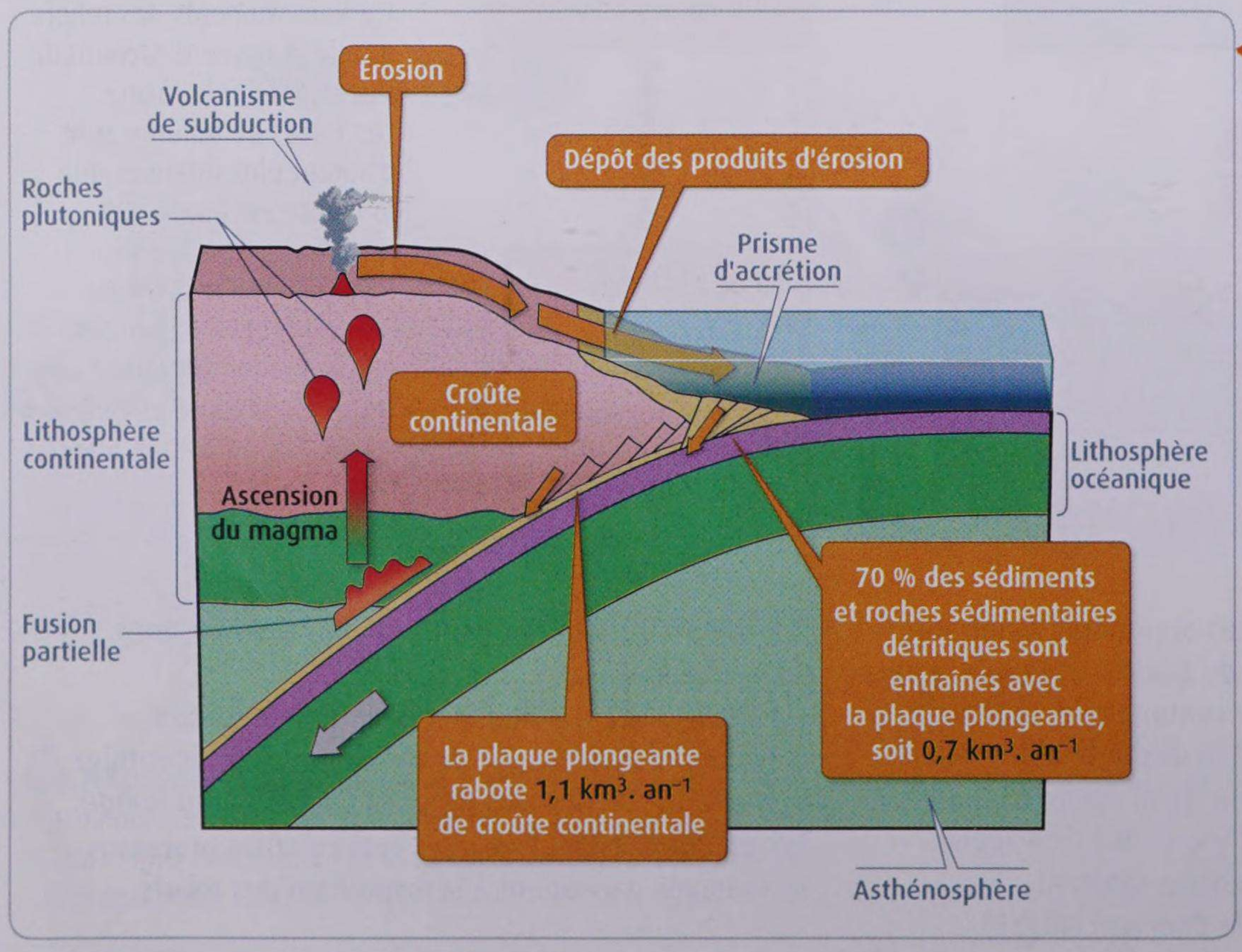
L'âge des roches les plus anciennes de la lithosphère océanique n'excède pas 200 millions d'années, tandis que la lithosphère continentale comprend les roches les plus anciennes de la Terre, âgées de plus de 4 milliards d'années.

Comment la lithosphère continentale a-t-elle pu conserver les roches les plus anciennes de la Terre ?

Localisation et quantification du recyclage lithosphérique

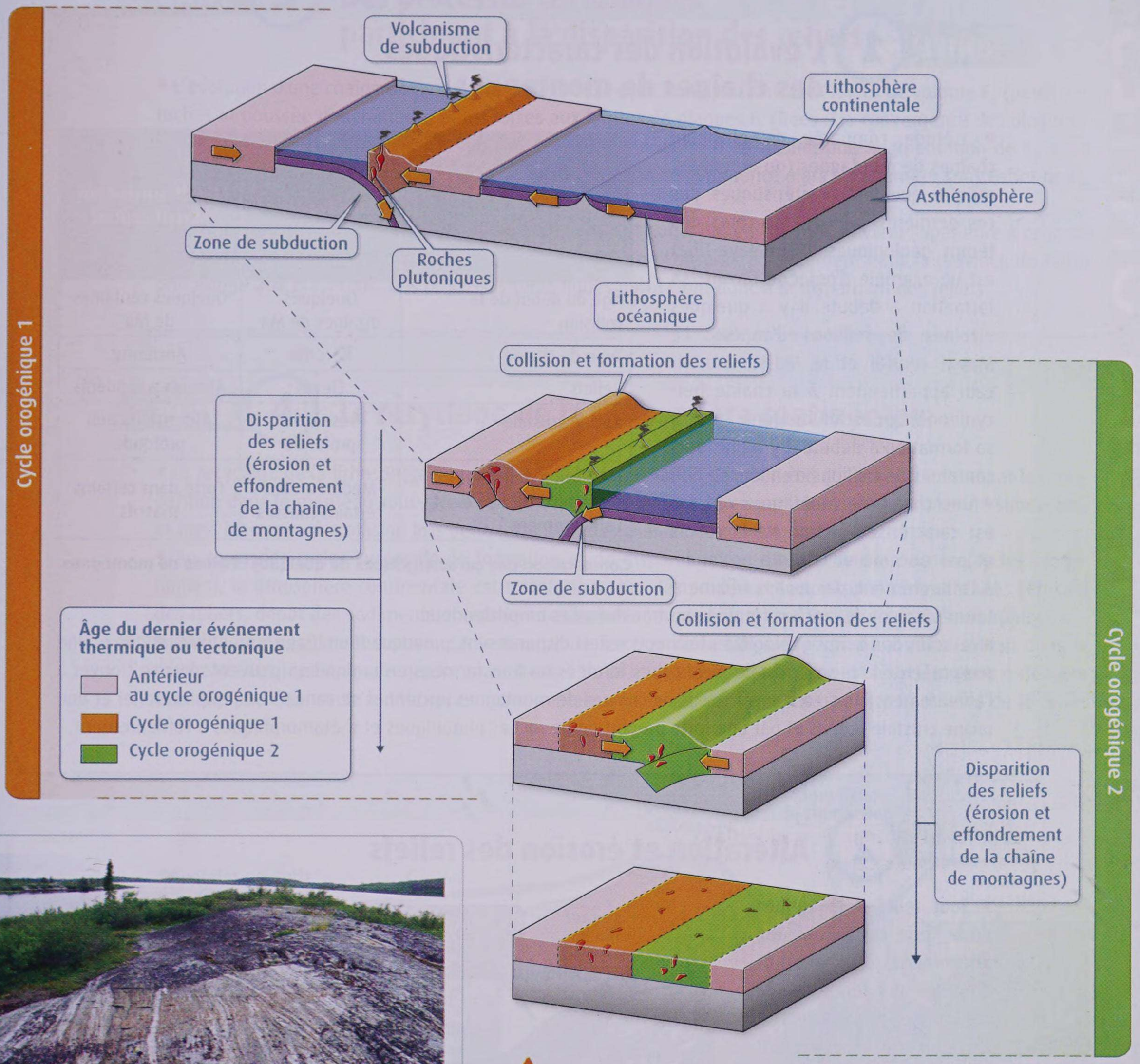


1 Carte des flux sédimentaires mondiaux. La majorité des sédiments se dépose en domaine continental, soit émergé, soit immergé (plateaux continentaux).



2 Recyclage de la lithosphère continentale et de la lithosphère océanique dans une zone de subduction. Les roches de la lithosphère sont recyclées si elles disparaissent dans le manteau asthénosphérique ou si, après leur mise en place, elles sont affectées par des processus tectoniques, sédimentaires (érosion/sédimentation), magmatiques ou métamorphiques. Les zones de subduction sont des lieux de disparition de la lithosphère. La quasi-totalité de la lithosphère océanique y disparaît. Les valeurs indiquées ci-contre concernent la disparition de la lithosphère continentale à l'échelle de la planète. Volume total de la lithosphère continentale : 27.10^9 km³.

Devenir de la lithosphère au cours des cycles orogéniques



3 Les gneiss d'Acasta (Canada).
Âgées de 4,02 milliards d'années, ces roches sont les plus anciennes connues sur Terre.

4 Recyclage des lithosphères océanique et continentale au cours de cycles orogéniques successifs. Un tel cycle décrit l'ensemble des événements impliqués dans la formation puis la disparition d'une chaîne de montagnes (ou orogène). L'âge du dernier événement thermique (magmatisme, métamorphisme) ou tectonique (compression, extension) auquel la lithosphère continentale a été soumise est indiqué.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

Indiquez, à l'aide d'un schéma, où et comment sont recyclées les lithosphères océanique et continentale et expliquez pourquoi cette dernière a conservé des roches excédant 200 Ma, contrairement à la lithosphère océanique.

Pour cela, vous pouvez :
- indiquer le devenir des roches de la lithosphère continentale en fonction des contextes géodynamiques **(DOC. 1 À 4)**.
- identifier le contexte géodynamique du recyclage de la lithosphère océanique **(DOC. 2 ET 4)**.
- comparer le pourcentage de disparition de la lithosphère continentale à celui de la lithosphère océanique au bout de 200 Ma **(DOC. 2)**.

CHAPITRE 4 La disparition des reliefs

UNITÉ 1 L'évolution des caractéristiques des chaînes de montagnes

• L'étude comparée de plusieurs chaînes de montagnes (ou orogènes) montre que les caractéristiques des ces dernières évoluent au cours des temps géologiques. L'Himalaya-Tibet est un exemple d'orogène récent : sa formation a débuté il y a quelques dizaines de millions d'années. Le Massif central et le Massif armoricain appartiennent à la chaîne hercynienne, qui est un orogène ancien : sa formation a débuté il y a plusieurs centaines de millions d'années.

Chaîne de montagnes / Caractéristiques	Himalaya- Tibet	Massif armoricain, Massif central
Âge du début de la collision	Quelques dizaines de Ma	Quelques centaines de Ma
Type de chaine	Récente	Ancienne
Reliefs	Élevés	Absents à modérés
Racine crustale	Présente et profonde	Absente ou peu profonde
Proportion de roches d'origine profonde à l'affleurement	Modérée dans certains massifs	Forte dans certains massifs

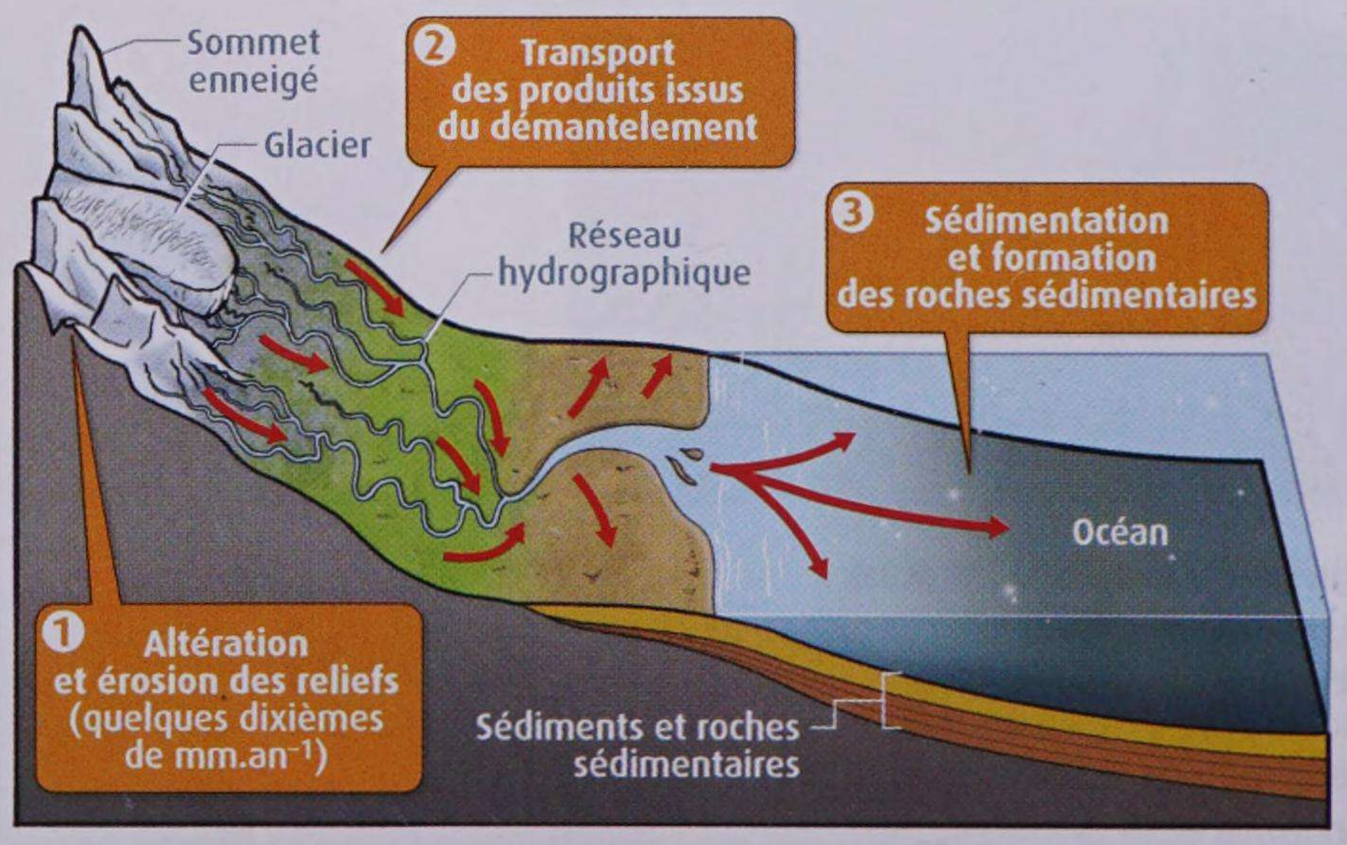
Comparaison des caractéristiques de quelques chaînes de montagnes.

• Une chaîne de montagnes récente est caractérisée par de hauts reliefs et par une racine crustale profonde. À l'affleurement, des roches sédimentaires côtoient des roches formées ou transformées en profondeur.

• Au cours des temps géologiques les hauts reliefs disparaissent, provoquant un réajustement isostatique et une remontée de la racine crustale. Des roches formées ou transformées en profondeur peuvent alors se trouver à l'affleurement. Ainsi, certains massifs de chaînes de montagnes anciennes se caractérisent par un relief et une racine crustale réduits et par une forte proportion de roches plutoniques et métamorphiques à l'affleurement.

UNITÉ 2 Altération et érosion des reliefs

• Tout relief à la surface de la Terre est soumis aux phénomènes d'altération et d'érosion qui tendent à le démanteler. Les glaciers et les eaux de ruissellement sont des acteurs efficaces de la disparition des reliefs. Les glaciers réduisent les roches en débris, favorisant ainsi l'altération des minéraux par hydrolyse.



Altération et érosion des reliefs.

• Les produits issus du démantèlement sont des débris solides (sédiments) et des ions dissous. Ils sont transportés par le réseau hydrographique dans des bassins sédimentaires continentaux ou océaniques associés à la chaîne de montagnes. Les sédiments s'y déposent et forment, après consolidation, des roches sédimentaires détritiques. Les ions dissous y précipitent et forment d'autres types de roches sédimentaires (calcaires). Ces processus impliqués dans la disparition des reliefs débutent dès la formation de la chaîne.

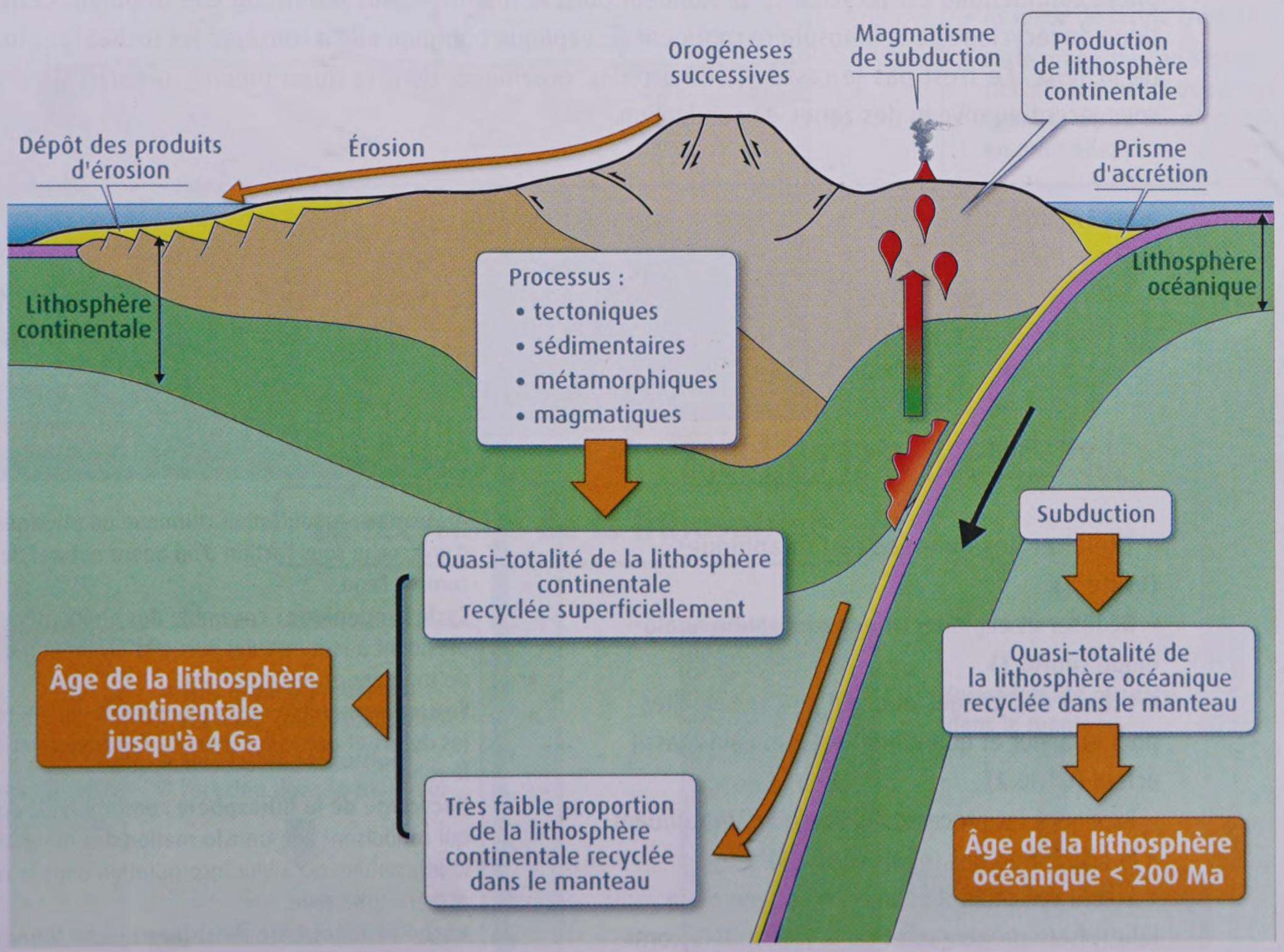
• La vitesse d'érosion d'une chaîne de montagnes récente est de quelques dixièmes de millimètre par an.

UNITÉ 3 Des processus tectoniques participant à la disparition des reliefs

- L'évolution d'une chaîne de montagnes est contrôlée par le rapport entre les forces de volume F_V (poids des roches et poussée d'Archimède) et les forces aux limites de plaques F_L (liées à la convergence des plaques).
- Sous l'effet de F_L, la croûte s'épaissit et les reliefs s'érigent. Il en résulte une augmentation de F_V, dont l'intensité finit par atteindre celle de F_L. Le cœur de la chaîne commence alors à s'effondrer sous l'effet de F_V, comme on l'observe actuellement dans les Alpes.
- Lorsque la vitesse de convergence diminue ou devient nulle, l'intensité de F_V devient supérieure à celle de F_L et toute la chaîne de montagnes s'effondre, comme on l'observe actuellement dans la province de *Basin and Range* aux États-Unis. Des processus tectoniques participent donc à la disparition des reliefs.

UNITÉ 4 Le recyclage de la lithosphère continentale

- Le recyclage de la lithosphère se traduit par la transformation des roches qui la constituent ou par leur disparition dans le manteau sous-jacent. La lithosphère continentale est recyclée dans les zones de subduction et dans les zones de collision lors de la formation des chaînes de montagnes.
- Au cours des cycles successifs de formation et de disparition des chaînes de montagnes (cycles orogéniques), la lithosphère continentale est transformée par des processus tectoniques, sédimentaires (érosion des reliefs, dépôt des sédiments, formation des roches sédimentaires), magmatiques et métamorphiques.
- Dans les zones de subduction, seule une petite fraction de la lithosphère continentale disparaît dans le manteau sous-jacent, tandis que la quasi-totalité de la lithosphère océanique y est recyclée. Cette différence explique pourquoi seule la lithosphère continentale a pu conserver les roches les plus anciennes de la Terre.



Le recyclage de la lithosphère océanique et de la lithosphère continentale.

CHAPITRE 4

La disparition des reliefs

L'ESSENTIEL

L'essentiel par le texte

L'évolution des chaînes de montagnes

• Les hauts reliefs qui caractérisent les chaînes de montagnes à l'époque de leur formation sont des systèmes instables qui tendent à disparaître.

• L'**altération** et l'**érosion** contribuent au démantèlement des parties superficielles des reliefs. Les produits de ce démantèlement sont transportés principalement par l'eau jusque dans des bassins sédimentaires plus ou moins éloignés des reliefs. Les sédiments s'y déposent puis forment, après consolidation, des **roches sédimentaires détritiques**. Les ions dissous y précipitent, formant d'autre types de roches sédimentaires. Ces processus se produisent dès la naissance d'une chaîne de montagnes.

• Lorsque les forces liées au poids des reliefs et à la poussée d'Archimède contrebalancent celles liées à la convergence des plaques lithosphériques, l'épaississement maximal de la croûte est atteint et le cœur de la chaîne de montagnes commence à s'effondrer. L'effondrement se propage ensuite au reste de la chaîne.

• Ces processus sédimentaires et tectoniques entraînent un rééquilibrage isostatique associé à une remontée de la racine crustale située à l'aplomb de la chaîne de montagnes. L'ensemble de ces phénomènes exhume des roches formées et/ou transformées en profondeur, qui affleurent ainsi en grande proportion dans certaines chaînes anciennes.

Le recyclage de la lithosphère continentale

• Le **recyclage** de la lithosphère continentale a lieu pour l'essentiel au sein même de cette lithosphère où, lors des **cycles orogéniques** successifs, les roches sont transformées par des processus sédimentaires, tectoniques, métamorphiques et magmatiques.

• Par le passage en subduction des sédiments et roches sédimentaires, seule une très faible proportion de lithosphère continentale est recyclée en profondeur dans le manteau sous-jacent, où elle disparaît. Cette caractéristique du recyclage de la lithosphère continentale explique pourquoi elle a conservé les roches les plus anciennes de la Terre. Ce n'est pas le cas de la lithosphère océanique, dont la quasi-totalité disparaît dans le manteau sous-jacent au niveau des zones de subduction.

Les capacités et attitudes

- Exploiter des données cartographiques **(unité 1)**
- Réaliser et exploiter une modélisation analogique **(unité 1)**
- Utiliser des images et des données satellites pour qualifier et quantifier l'érosion d'un massif actuel **(unité 2)**
- Expliquer les processus tectoniques contribuant à la disparition des reliefs **(unité 3)**
- Établir un schéma bilan du recyclage de la lithosphère océanique et de la lithosphère continentale **(unité 4)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Altération : modification chimique ou physique d'une roche sous l'action d'un agent naturel de surface comme l'eau.

Cycle orogénique : ensemble des phénomènes qui président à la formation puis à la disparition d'une chaîne de montagnes (ou orogène).

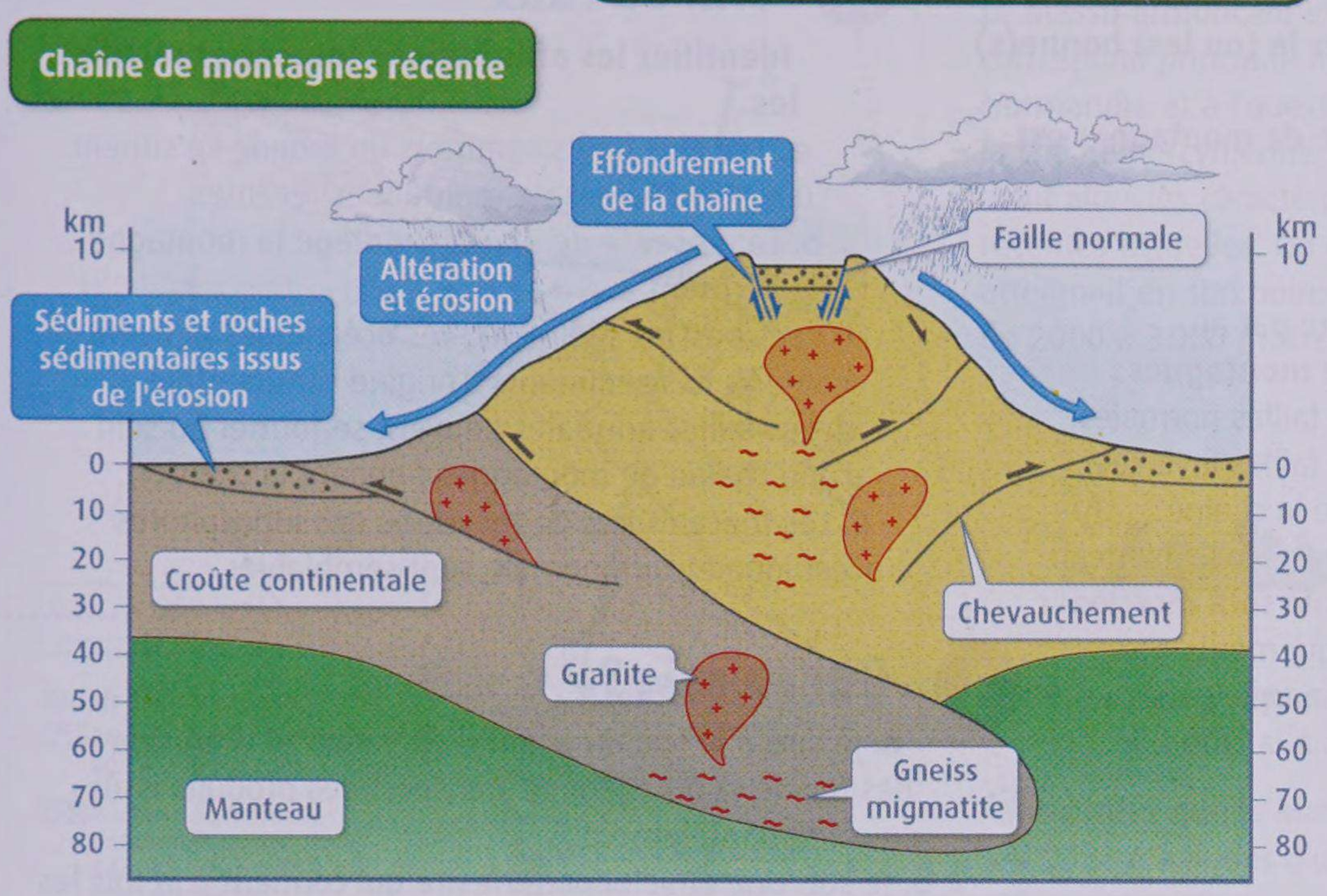
Érosion : ensemble des phénomènes qui altèrent, enlèvent les débris et particules issus de l'altération, et modifient le relief.

Recyclage de la lithosphère : ensemble des processus qui conduisent à la transformation des matériaux de la lithosphère ou à leur incorporation dans le manteau asthénosphérique.

Roche sédimentaire détritique : roche formée par accumulation puis consolidation de sédiments d'origine continentale.

L'essentiel par l'image

La disparition des reliefs



- Reliefs élevés
- Racine crustale profonde
- Altération et érosion
- Effondrement de la chaîne
- Réajustement isostatique

- Reliefs faibles
- Absence de racine crustale
- Forte proportion en surface (à l'affleurement) de roches formées et/ou transformées en profondeur

Le recyclage de la lithosphère

Lithosphère continentale

- Très grande proportion recyclée superficiellement
- Très faible proportion recyclée dans le manteau

→ **Âge jusqu'à 4 milliards d'années**

Lithosphère océanique

- Quasi-totalité recyclée dans le manteau

→ **Âge inférieur à 200 millions d'années**

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La vitesse d'érosion d'une chaîne de montagnes est:

a. de l'ordre du décimètre par an.
b. de l'ordre du centimètre par an.
c. de l'ordre du millimètre par an.
d. de l'ordre du dixième de millimètre par an.

2. L'effondrement d'une chaîne de montagnes:

a. est caractérisé par la présence de failles normales.
b. est caractérisé par la présence de failles inverses.
c. se manifeste par une extension de la chaîne.
d. fait disparaître la croûte continentale dans le manteau.

3. Les roches de la croûte continentale sont recyclées:

a. dans les zones de subduction uniquement.
b. en totalité dans le manteau asthénosphérique.
c. par réincorporation des sédiments à la croûte continentale.
d. par des processus magmatiques et métamorphiques entre autres.

2 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Les plus hauts sommets du monde se situent dans les chaînes de montagnes récentes.
b. La présence de glaciers protège la montagne de l'érosion.
c. Les bassins sédimentaires océaniques peuvent contenir des sédiments d'origine continentale.
d. Les failles normales peuvent se former au sein d'une chaîne de montagnes pendant la collision.
e. Les mécanismes de recyclage des lithosphères océanique et continentale sont semblables.

3 Qui suis-je ?

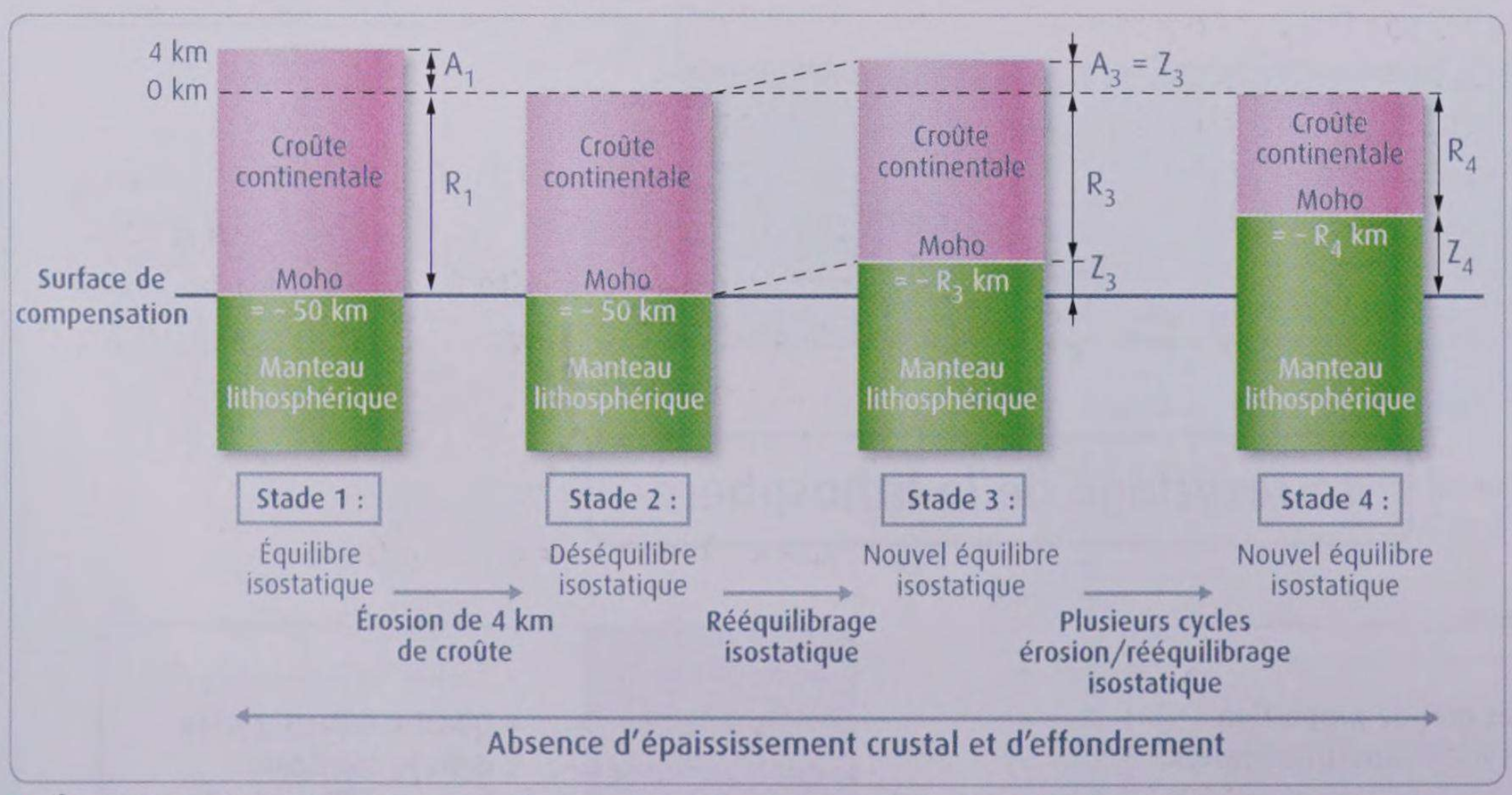
a. Je suis à la fois un agent d'altération et d'érosion des reliefs et un agent de transport des produits issus de ce démantèlement.
b. Je suis une enveloppe terrestre qui contient à la fois les roches les plus anciennes de la Terre et des roches récentes.

s'entraîner avec un exercice guidé

PISTE

4 Érosion et équilibre isostatique

On considère l'évolution d'une chaîne de montagnes de 4 km de haut (stade 1), jusqu'à sa disparition complète (au stade 4), la croûte continentale étant alors à l'altitude zéro. Au niveau de la surface de compensation, toutes les colonnes de matériaux en équilibre isostatique ont une densité identique.



1. Évolution simplifiée d'une chaîne de montagnes. A_n : altitude de la chaîne de montagnes au stade n ; R_n : hauteur de la racine crustale au stade n ; D_n : densité de la colonne de roche située au dessus de la surface de compensation au stade n ; Z_n : hauteur du manteau lithosphérique au dessus de la surface de compensation. Densité de la croûte continentale/du manteau lithosphérique : 2,7/3,3.

Un peu d'aide

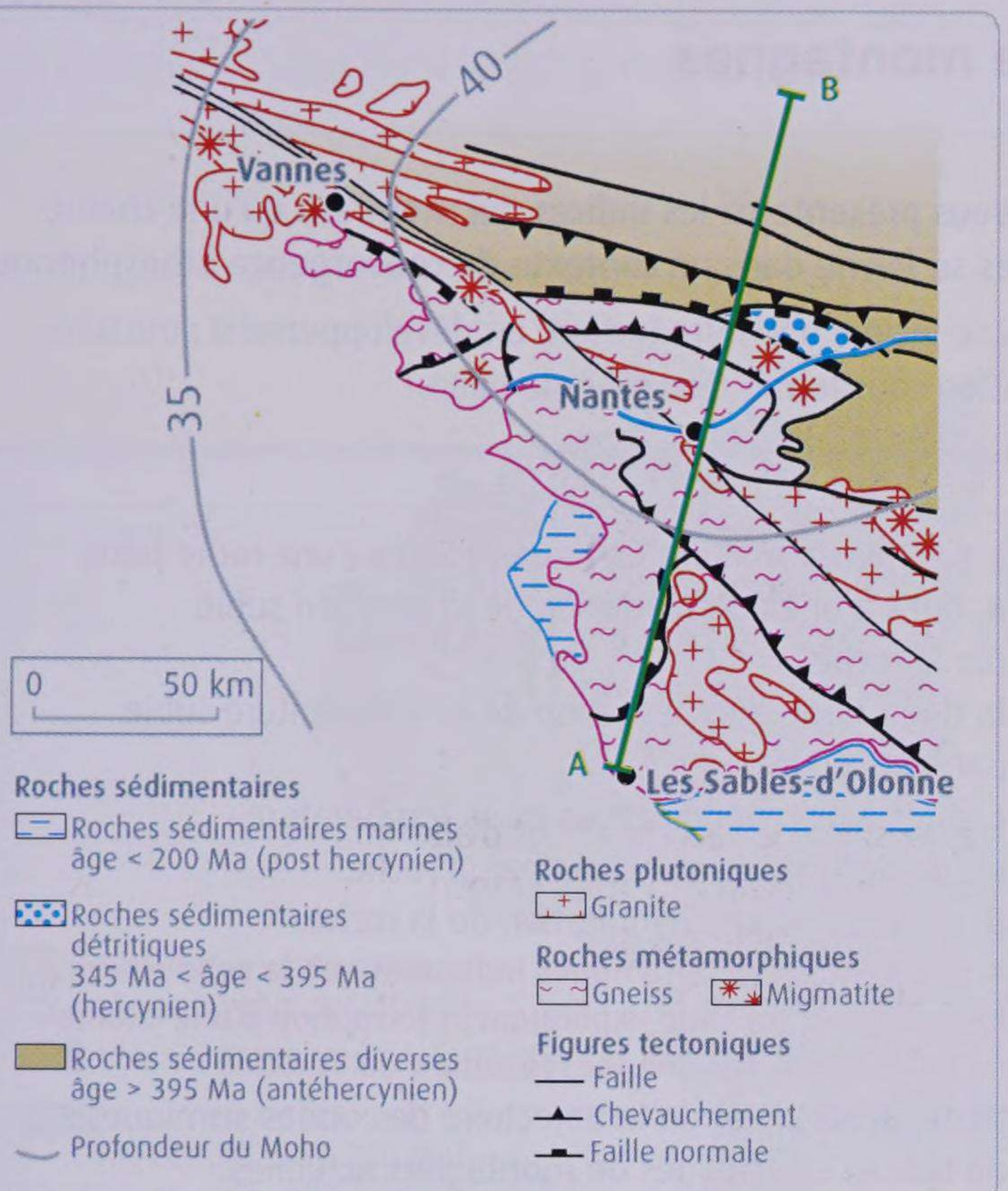
• Mobiliser les connaissances
Expliquez pourquoi on peut considérer $D_1 = D_3 = D_4 \neq D_2$

• Raisonner, calculer
– Exprimez D_1 en fonction de A_1 et R_1 ; puis D_3 en fonction de R_1 et Z_3. Calculez Z_3. Déduisez-en A_3.
– Exprimez D_4 en fonction de R_4 et Z_4. En utilisant le fait que $R_1 = R_4 + Z_4$, déduisez-en l'épaisseur totale de croûte érodée depuis le stade 1.
– Comparez la profondeur du Moho au stade 4 à celle d'une croûte continentale stable.

QUESTION ❶ Calculez l'altitude de la chaîne de montagnes au stade 3. ❷ Calculez l'épaisseur de croûte continentale érodée entre le stade 1 (chaîne de montagnes de 4 km de haut) et le stade 4, pour lequel il n'existe plus aucun relief.

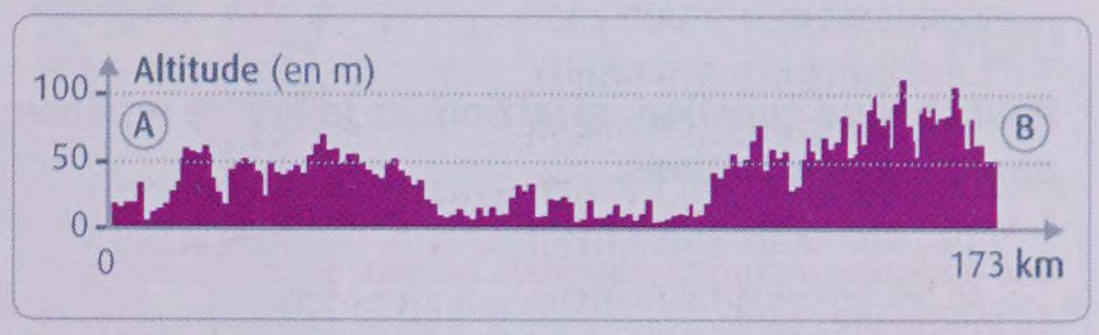
5 Les caractéristiques d'une chaîne de montagnes ancienne

Extraire des données cartographiques



1. Carte géologique simplifiée du sud du Massif armoricain.

Le Massif armoricain est situé à l'ouest de l'Europe, et correspond principalement à la Bretagne, à l'ouest de la Normandie et à l'ouest des Pays de la Loire. Il appartient à la chaîne hercynienne, formée entre – 400 et – 250 Ma, qui avait alors les caractéristiques des chaînes de montagnes récentes actuelles. On estime que le Massif armoricain atteignait en son point culminant des altitudes de l'ordre de 2000 à 3 000 mètres.



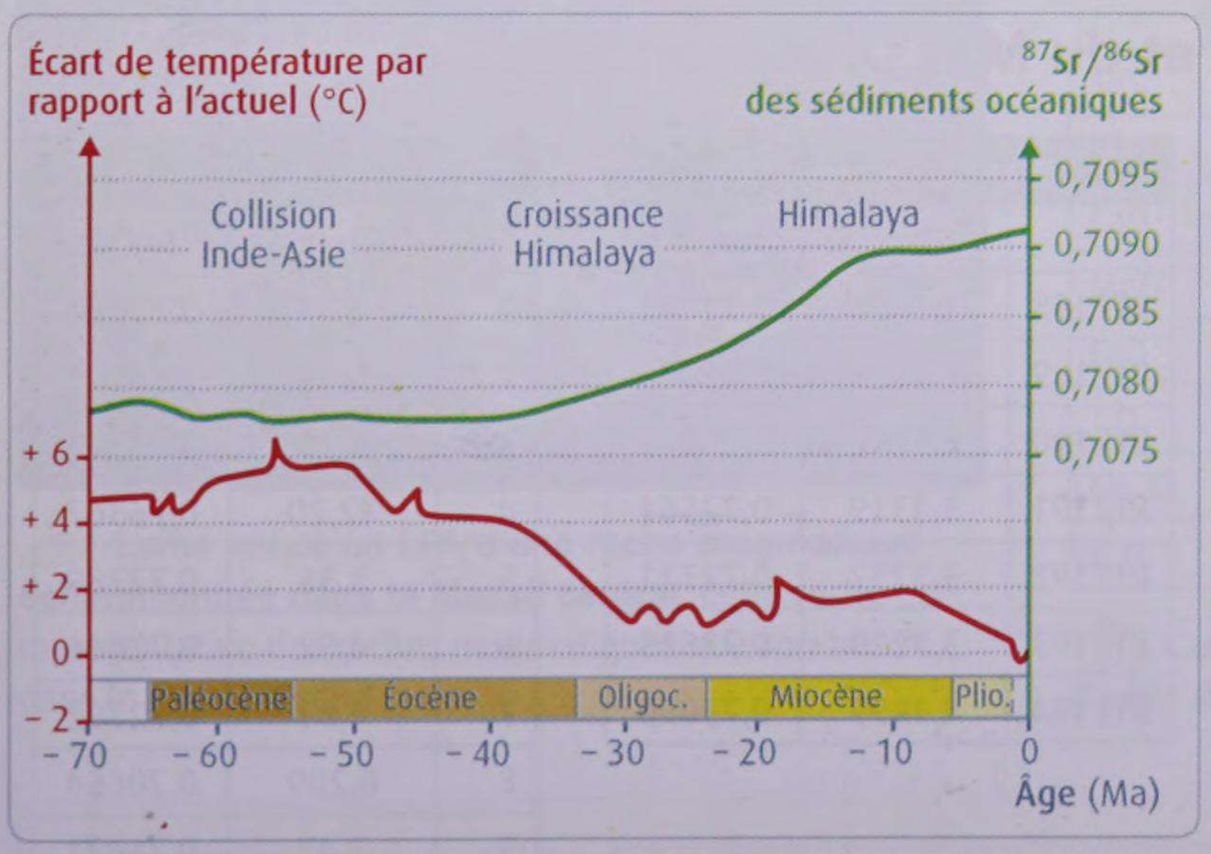
2. Coupe topographique dans le Massif armoricain.

1. Montrez que le Massif armoricain possède les caractéristiques d'une chaîne de montagnes ancienne.
2. Expliquez les phénomènes qui ont fait évoluer les caractéristiques du Massif armoricain de sa formation à aujourd'hui.
3. Montrez, grâce à la carte, que ces phénomènes débutent dès la naissance de la chaîne de montagnes.

6 Tectonique, érosion et climat

Saisir et mettre en relation des informations

Le strontium (Sr) est un élément chimique présent à l'état de trace dans les roches terrestres. On constate que le rapport isotopique $^{87}Sr/^{86}Sr$ dans la croûte continentale est supérieur à celui des roches du manteau et de la croûte océanique. Ce rapport est donc un traceur qui peut permettre d'identifier l'origine continentale ou océanique des sédiments.



1. Évolution de paramètres tectoniques, isotopiques et climatiques entre – 65 Ma et l'actuel.

L'anorthite (feldspath) est un des minéraux majoritaires de la croûte continentale. Son altération s'écrit selon l'équation suivante :

$CaAl_2Si_2O_8$ (anorthite) + $3H_2O$ + 2 CO_2 ⇌ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (kaolinite) + Ca^{2+} + 2 HCO_3^-.

Dans l'océan, Ca^{2+} et HCO_3^- précipitent et forment de la calcite ($CaCO_3$, entrant dans la composition des roches carbonatées), selon la réaction suivante :

$$Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- \rightleftharpoons CO_2 + H_2O + CaCO_3$$

2. Altération chimique de l'anorthite.

1. Mettez en relation l'évolution du rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ des sédiments océaniques avec les événements tectoniques en Asie.
2. Calculez combien de moles de CO_2 sont consommées pour une mole d'anorthite altérée, en tenant compte de la formation de calcite.
3. Proposez une hypothèse pour expliquer l'évolution de la température figurée dans le document 1.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 Le contexte de formation des chaînes de montagnes

Les chaînes de montagnes présentent, à l'échelle du paysage, de la roche ou du minéral, des indices qui témoignent de leur histoire.

QUESTION Vous présenterez les indices qui montrent qu'une chaîne de montagnes se forme dans un contexte de convergence lithosphérique.

✔ Votre réponse inclura une introduction, un développement structuré et une conclusion sous forme d'un schéma bilan.

QCM

Pour chaque question, sélectionnez la bonne réponse parmi les propositions.

1. Les caractéristiques qui permettent d'identifier une ancienne marge continentale passive dans une chaîne de montagnes sont :

a. la présence de roches sédimentaires.
b. la présence d'ophiolites.
c. la présence de failles inverses qui décalent des formations géologiques.
d. la présence de failles normales qui décalent des formations géologiques.

2. Les caractéristiques qui permettent d'identifier des ophiolites dans une chaîne de montagnes sont :

a. la présence de sédiments caractéristiques de milieux océaniques peu profonds.
b. la présence d'organismes marins fossiles.
c. la présence de basaltes en coussins, de gabbros et de serpentinites.
d. la présence de granites et de roches métamorphiques.

3. Les transformations métamorphiques d'une roche sont :

a. dues à une augmentation de la pression subie par la roche.
b. dues à une augmentation de la température subie par la roche.
c. dues à des modifications de la température et/ou de la pression subies par la roche.
d. nécessitent une hydratation de la roche.

4. Des données géophysiques indiquent que la subduction fait partie du scénario expliquant la formation d'une chaîne de montagnes. Ces données résultent de l'étude :

a. de la vitesse et de la trajectoire des ondes sismiques au niveau des chaînes de montagnes actuelles.
b. de la trajectoire des ondes sismiques au niveau des chaînes de montagnes actuelles.
c. de la vitesse des ondes sismiques dans les zones de subduction actuelles.
d. de l'évolution des caractéristiques physiques de la lithosphère océanique lorsqu'elle s'éloigne de la dorsale.

Exploiter des résultats expérimentaux

3 points

2 L'âge des granites du Massif central et du Massif armoricain

Le Massif central et le Massif armoricain sont des massifs granitiques. On cherche à savoir si ces massifs sont contemporains. L'âge d'une roche magmatique peut être déterminé à partir des rapports isotopiques $^{87}Sr/^{86}Sr$ et $^{87}Rb/^{86}Sr$, et de l'équation suivante :

$$\left[\frac{^{87}Sr_t}{^{86}Sr_t}\right] = (e^{\lambda t} - 1)\left[\frac{^{87}Rb_t}{^{86}Sr_t}\right] + \left[\frac{^{87}Sr_0}{^{86}Sr_0}\right]$$

avec $\lambda = 1{,}42.10^{-11}$ an^{-1}.

On a mesuré les rapports $^{87}Sr/^{86}Sr$ et $^{87}Rb/^{86}Sr$ de plusieurs minéraux pour le granite de Meymac (Massif central) et pour le granite de Plouaret (Massif armoricain).

Granite de Meymac		
	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
RT7188	1,7578	0,71903
RT7189	2,1926	0,72076
RT7190	2,6272	0,72279
RT7191	3,1319	0,72561
RT7192	3,3737	0,72711
RT7193	3,7229	0,72833
RT7194	4,1099	0,73090

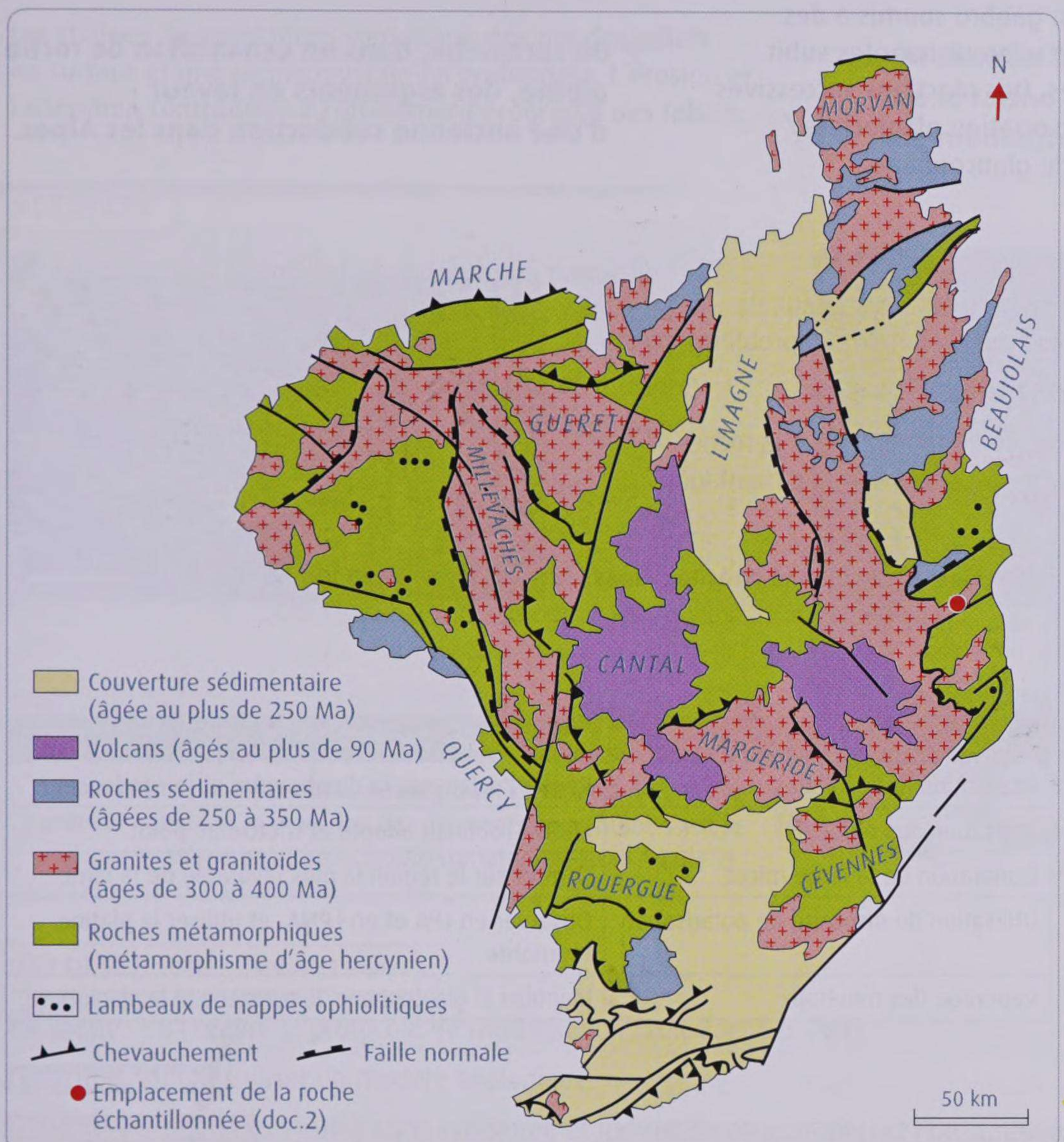
Granite de Plouaret		
	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
1	1,54	0,71290
2	5,60	0,73247
3	5,70	0,73247
4	12,20	0,76367
5	3,38	0,72289
6	4,52	0,72666
7	4,81	0,72782
8	0,209	0,70664
9	2,47	0,71671
10	6,18	0,73408

QUESTION Déterminez, sans utiliser la calculatrice, si les granites du Massif central et du Massif armoricain sont contemporains.

Résoudre un problème scientifique

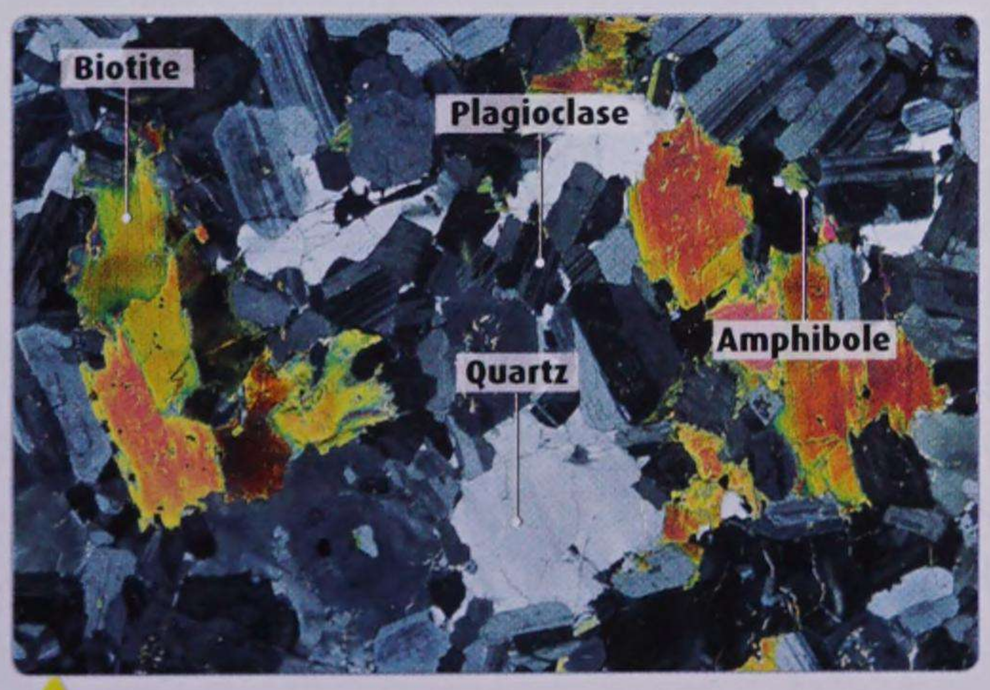
5 points

3 Le magmatisme du Massif central



1 Carte géologique simplifiée du Massif central.

Le Massif central appartient à un très vaste ensemble géologique, qui s'est mis en place à partir de – 400 Ma, de l'Espagne jusqu'à l'Europe centrale : la chaîne hercynienne. Lorsque cette chaîne était jeune, elle était sans doute comparable à l'Himalaya d'aujourd'hui.
Le Massif central couvre aujourd'hui un vaste territoire d'environ 90 000 km², soit environ un sixième de la surface de la France, avec une altitude moyenne de 715 m.



2 Lame mince en LPA d'une roche magmatique échantillonnée dans le Massif central. Cette roche est représentative des roches magmatiques que l'on trouve dans le Massif central.

	Composition moyenne de la roche échantillonnée (% de masse)	Rapport quantité dans la roche échantillonnée / quantité moyenne dans les roches de la croûte continentale
SiO_2	66,88	1,05
Al_2O_3	15,66	1,03
CaO	3,56	0,89
MgO	1,57	0,71
FeO	3,79	0,77
TiO_2	0,57	0,95
Na_2O	3,84	1,24
K_2O	3,07	0,93

3 Composition chimique de la roche échantillonnée comparée à celle de la croûte continentale moyenne.

QUESTION À partir des informations fournies et de leur mise en relation avec vos connaissances, montrez qu'un magmatisme associé à une subduction passée est à l'origine de l'essentiel de la croûte continentale aujourd'hui à l'affleurement dans le Massif central.

objectif BAC

1 Des arguments en faveur d'une ancienne subduction dans les Alpes

Dans un contexte de subduction, un gabbro soumis à des conditions de température et de pression croissantes subit des transformations minéralogiques. Des réactions successives peuvent conduire, à partir d'une association plagioclase/pyroxène/chlorite, à la formation de glaucophane.

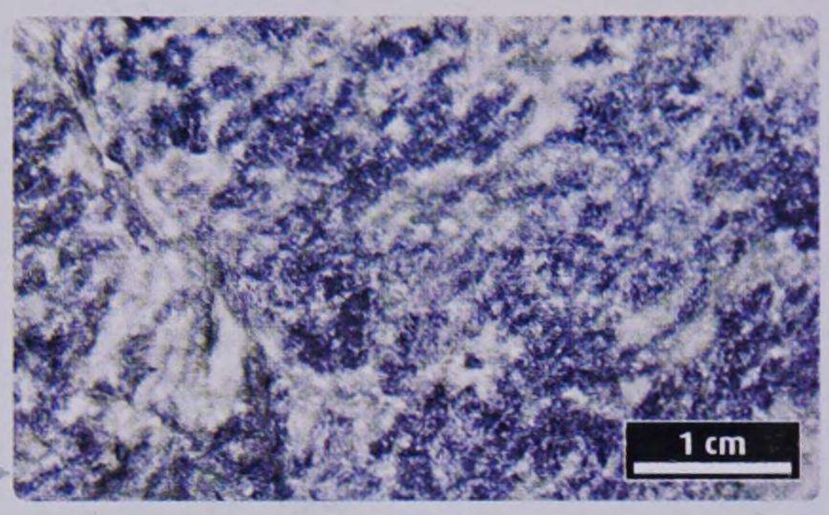
On recherche, dans un échantillon de roche alpine, des arguments en faveur d'une ancienne subduction dans les Alpes.

ACTIVITÉ

❶ Justifiez l'intérêt de rechercher la présence des minéraux de glaucophane dans l'échantillon proposé pour répondre au problème posé.

Capacité évaluée Comprendre la manipulation.

Pour réussir Faire le lien entre la présence du minéral dans la roche, les conditions de sa formation et la genèse d'une chaîne de montagnes.



Un schiste bleu échantillonné dans les Alpes.

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Observez, au microscope polarisant, la lame mince de métagabbro et centrez-la sur un minéral de glaucophane (minéral bleu à violet en LPNA, teintes vives en LPA).

Capacité évaluée Utiliser le microscope polarisant.

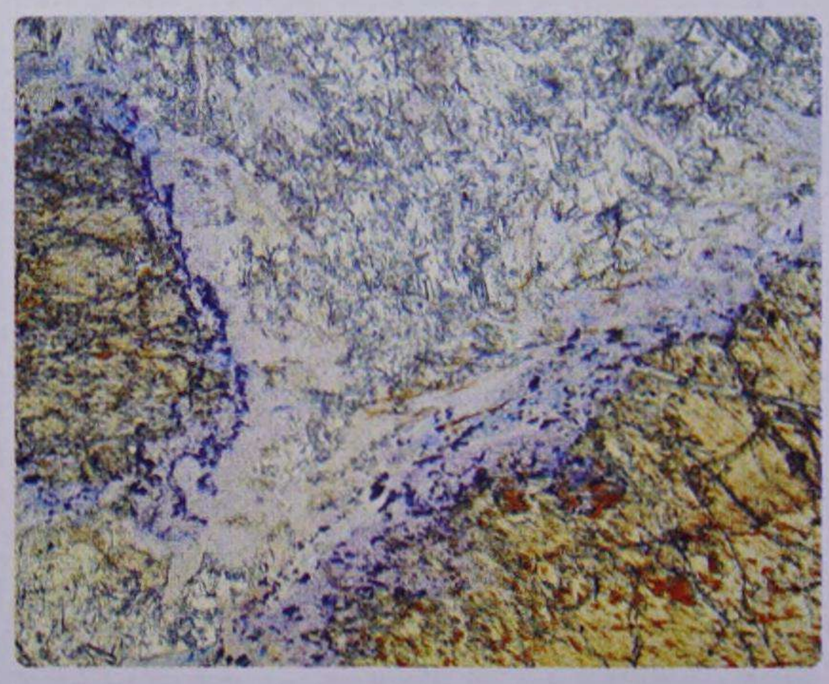
Critères d'évaluation	Pour réussir
Réalisation des réglages	Régler l'éclairage, le diaphragme et le condenseur
Utilisation des objectifs	Choisir l'objectif adapté et mettre au point
Exploration de la lame mince	Centrer sur la région la plus favorable de la lame
Utilisation du dispositif de polarisation	Observer en LPA et en LPNA, et utiliser la platine tournante
Repérage des minéraux	Identifier la glaucophane, le pyroxène et le plagioclase

ACTIVITÉ

❸ Réaliser un dessin de la lame mince montrant l'auréole de glaucophane autour des pyroxènes, dans une matrice blanche de plagioclase.

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes représentation.

Critères d'évaluation	Pour réussir
Représentation fidèle au modèle	Respecter les proportions, les formes, l'agencement des minéraux
Qualité et soin	• Réaliser au crayon un tracé net et fin • Soigner mise en page et propreté
Exactitude scientifique de la légende	Légender les trois minéraux identifiés
Titre adapté et grossissement fourni	Proposer un titre qui précise les conditions d'observation et le grossissement



Un métagabbro en LPNA (x40).

ACTIVITÉ

❹ Argumenter l'existence d'une ancienne subduction dans les Alpes

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Présenter le minéral caractéristique du métagabbro étudié ; indiquer les conditions de formation de ce minéral ; associer ces conditions à une étape de la formation des Alpes.

2 L'évolution de la racine crustale d'une chaîne de montagnes

Les chaînes de montagnes sont marquées par des reliefs en surface et une racine crustale en profondeur. L'érosion et l'altération contribuent à l'effacement progressif des reliefs.

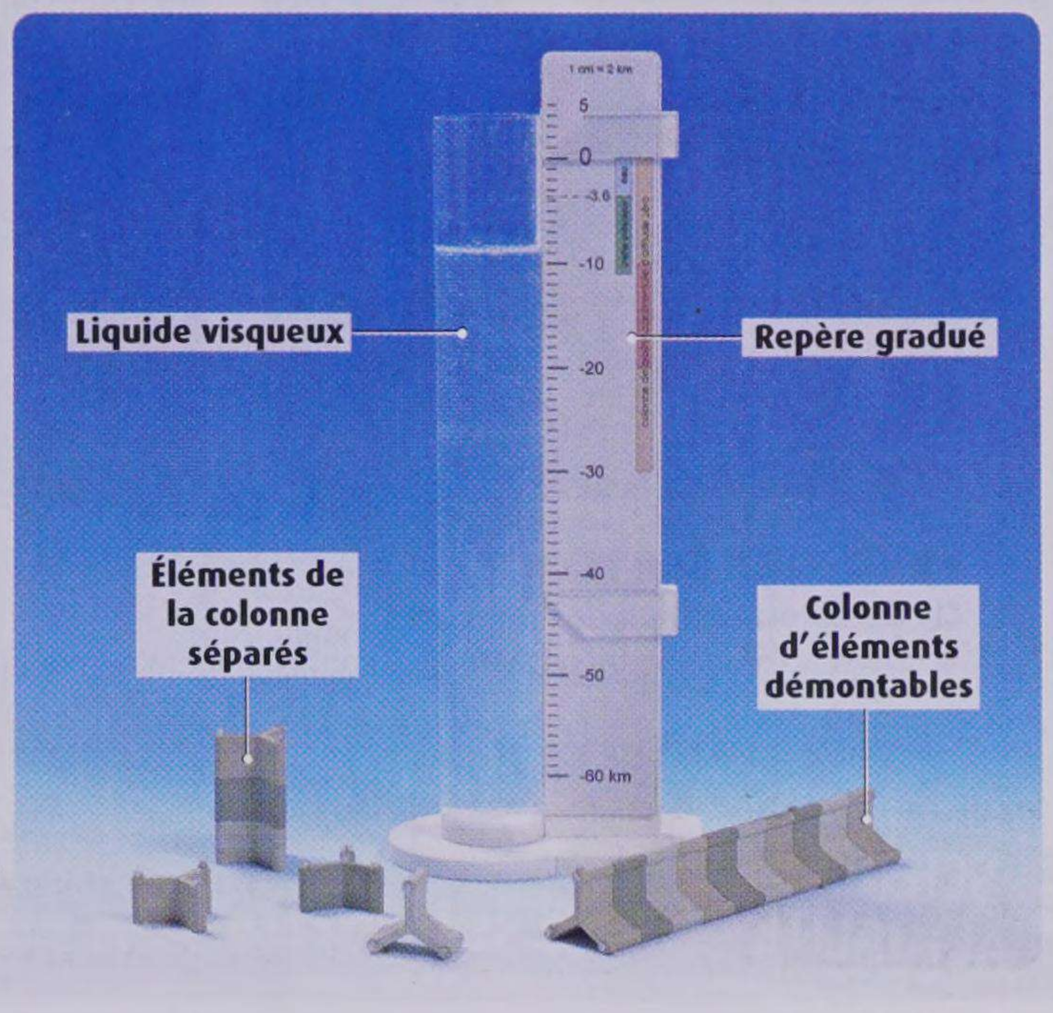
On cherche à déterminer l'évolution de la racine crustale d'une chaîne de montagnes au cours de l'érosion.

ACTIVITÉ

❶ Formulez une hypothèse et concevez un protocole utilisant les différents éléments du modèle analogique présenté ci-contre pour modéliser l'évolution de la racine crustale d'une chaîne de montagnes lors de son érosion.

Capacité évaluée Proposer une démarche de résolution.

Pour réussir Poser une hypothèse cohérente avec les données du problème ; envisager une modélisation en plusieurs étapes correspondant à différents stades d'érosion ; prévoir une quantification des résultats.



Les éléments du modèle analogique. Le rapport de densité entre le liquide et le matériau des éléments démontables est le même qu'entre la croûte continentale et le manteau.

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Mettez en l'œuvre le protocole de modélisation (voir doc. 3 p. 201).

Capacité évaluée Utiliser un modèle analogique.

Critères d'évaluation (1) Utilisation raisonnée et judicieuse du matériel ; (2) mesures réalisées.

Pour réussir (1) Repérer relief et racine crustale ; (2) mesurer, à chaque étape de l'expérience, la hauteur de l'élément modélisant le relief et l'épaisseur de l'élément modélisant la racine crustale.

ACTIVITÉ

❸ Présentez vos résultats de manière judicieuse (pour les mesures, voir photos des résultats p. 201).

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes représentation.

Critères d'évaluation (1) Modèle schématisé ; (2) mesures présentées.

Pour réussir (1) Légender le schéma et faire le lien entre le modèle et la réalité ; (2) présenter les valeurs mesurées dans un tableau à double entrée.

ACTIVITÉ

❹ Exploitez vos observations et vos mesures pour répondre au problème posé. Critiquez le modèle proposé.

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Confronter les données recueillies à l'hypothèse ; exploiter les résultats par un calcul simple ; rédiger une synthèse faisant le lien entre l'altitude des reliefs et l'épaisseur de la racine crustale ; critiquer de façon constructive la transposition de la modélisation à la réalité.

ATELIERS D'EXPLORATION

LE COIN DU LABO — Observer les effets de l'altération d'un granite

Le granite est une des roches de la croûte continentale. Lorsqu'il est à l'affleurement, ses minéraux s'altèrent, principalement sous l'action de l'eau.

Lame mince de granite sain

Lame mince de granite altéré

ACTIVITÉS

❶ Comparez de façon qualitative et quantitative les minéraux du granite sain et altéré, à l'aide de la clé de détermination suivante : www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menuprincipal.htm

❷ Déduisez-en la résistance des minéraux à l'altération.

POUR EN SAVOIR PLUS

Clé de détermination des minéraux

- www.ac-grenoble.fr/svt/SITE/prof/outils/mineralo/menuprincipal.htm

SCIENCES ACTUALITÉ — Une subduction en méditerranée

Lors de la plupart de ses éruptions, l'Etna, le plus haut volcan d'Europe, provoque des coulées de lave spectaculaires, mais inoffensives. Toutefois, il semble se muer lentement en un volcan explosif, beaucoup plus dangereux.

« À l'été 2001 [ainsi qu'en 2008], l'Etna a connu une violente éruption explosive. Bien que rares, de telles éruptions se sont produites plusieurs fois depuis quelques dizaines de milliers d'années.
Le caractère hybride de l'Etna résulte de sa situation géologique complexe [...] : il est à la fois proche de la zone de subduction ionienne et au-dessus d'un point chaud. Dès lors, ses éruptions sont un mélange de volcanisme de point chaud et de volcanisme de subduction. L'évolution vers le deuxième type provient soit de failles qui acheminent le magma depuis la zone de subduction, soit de la migration de cette zone vers l'Etna. »

D'après « La métamorphose de l'Etna », Dossier *Pour La Science* « La Terre à cœur ouvert », avril-juin 2010

1. Les transformations de l'Etna.

2. Le volcanisme en mer Méditerranée.

ACTIVITÉS

❶ Retrouvez quelques faits suggérant une zone de subduction en mer Méditerranée.

❷ Argumentez à partir de l'évolution de l'Etna que le caractère explosif des volcans de subduction est lié à la nature du magma.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Sur l'Etna : www.volcans.info/index.htm
- Une subduction en méditerranée : http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-vesuve-et-subduction.xml

MÉTIER

Parcours universitaire : devenir géologue

Le géologue est un acteur-clé de la planète : il exerce son métier dans des domaines aussi variés et essentiels que l'énergie, les matières minérales, l'eau, l'aménagement et l'environnement. Autant de secteurs cruciaux pour l'avenir.

Le plus couramment, le géologue démarre dans le métier avec un niveau Bac + 5 (diplôme d'ingénieur ou master d'Université). Avec un niveau Bac + 2 (BTS géologie appliquée), le technicien géologue seconde l'ingénieur.

La poursuite d'études avec un doctorat (Bac + 8/9) ouvre à la recherche. Deux filières forment l'essentiel des géologues à la géologie fondamentale ou appliquée :

- Les écoles d'ingénieurs auxquelles on accède généralement par concours (G2E) après une classe préparatoire (« prépas BCSPT »).
- Les universités qui proposent des masters « Pro » (professionnels) ou « Recherche » accessibles après trois années de licence.

La géologue Rebecca Roscoe au travail.

ACTIVITÉS

❶ Recherchez, dans votre environnement (commune, département, région...), des domaines ou des secteurs d'activités qui nécessitent les compétences d'un ingénieur en géologie.

❷ Recherchez sur le site de l'ENSG les différents domaines d'activité d'un géologue.

❸ Recensez quelques caractéristiques qui rendent le métier de géologue attractif.

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.onisep.fr onisep
- http://upa.it-sudparis.eu (de nombreux renseignements sur les BCPST)
- www.concoursg2e.org (liste des écoles de géologie)
- www.ensg.inpl-nancy.fr/ (site de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie)
- www.ufg.asso.fr (site de l'UFG Union française des géologues)

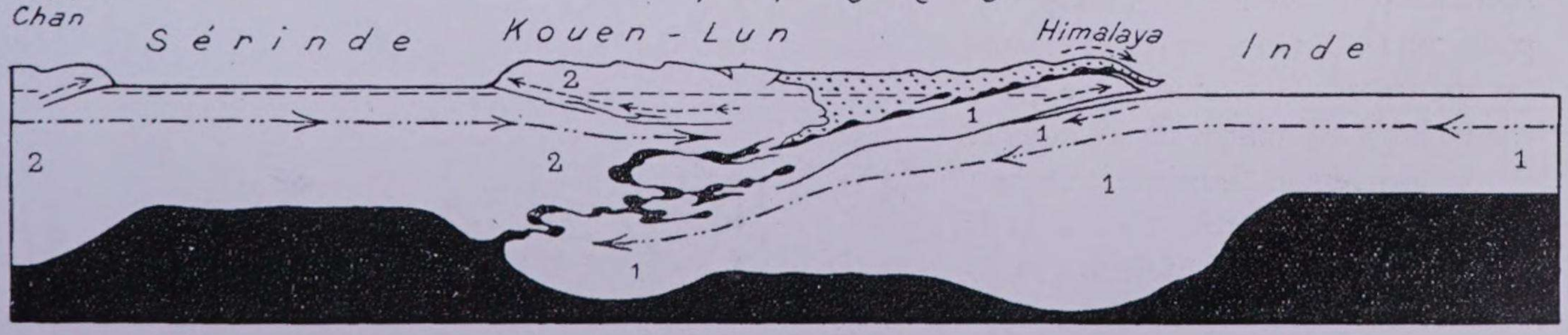
HISTOIRE DES SCIENCES

Emile Argand, un géologue visionnaire ?

Emile Argand (1879,1940) géologue suisse contemporain de Wegener propose dans son ouvrage « la tectonique de l'Asie » une interprétation nouvelle de la formation des chaînes de montagnes.
Voici un extrait de l'ouvrage majeur d'Emile Argand ainsi qu'une illustration montrant son interprétation de la chaîne de montagne de l'Himalaya.

« Il semble qu'il n'y ait aucun jeu tectonique [...] vertical, qui ne puisse être regardé comme la manifestation ou la conséquence directe ou indirecte, rapprochée ou lointaine, à délai relativement bref ou à très longue échéance, de déformations en volume dans lesquelles prévalent ou ont prévalu des jeux horizontaux »

Extrait de *La tectonique de l'Asie,* ouvrage publié en 1924 (p. 269).



ACTIVITÉS

❶ En quoi Argand peut il être considéré comme un défenseur de la théorie de Wegener et un visionnaire ?

❷ Discutez à la lueur des connaissances actuelles l'interprétation schématique proposée par Argand.

POUR EN SAVOIR PLUS

- http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/ Tapez Emile Argand dans le moteur de recherche proposé.

THÈME 4

Enjeux planétaires contemporains

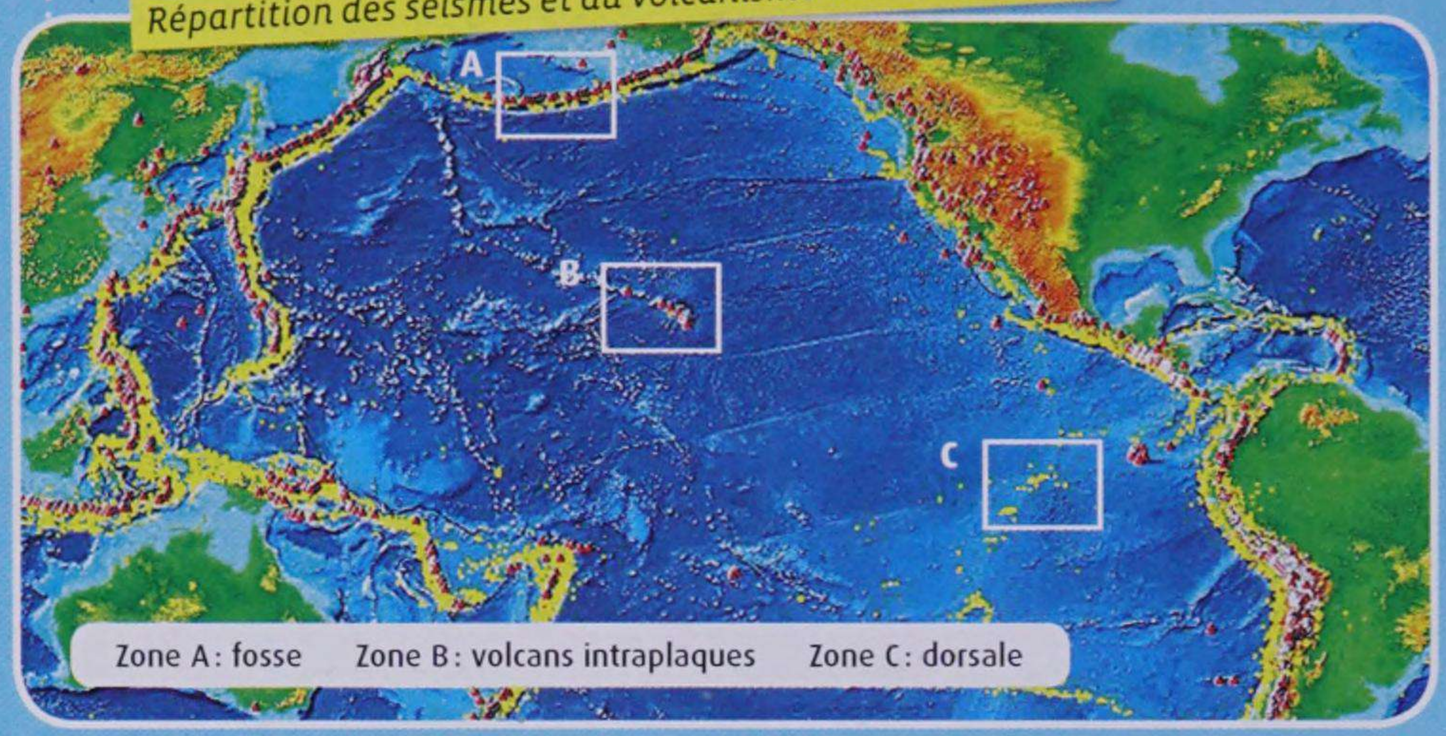
MOBILISER SES ACQUIS p. 222

1. Géothermie et propriétés thermiques de la Terre p. 225
2. La plante domestiquée p. 241

Le lac de la station thermale du Blue Lagoon en Islande. Son eau est chauffée par l'énergie géothermique.

1. Quelles sont les manifestations du mouvement des plaques ?

Répartition des séismes et du volcanisme dans le Pacifique



Zone A : fosse Zone B : volcans intraplaques Zone C : dorsale

Modélisation avec 2 couches de glycérine

1. **Indiquez les mouvements relatifs des plaques dans les zones A et C et décrivez les manifestations géologiques associées.**
2. **Quel processus physique est modélisé avec la glycérine ? Associez cette modélisation à l'une des 3 zones.**
3. **En quoi l'alignement volcanique de la zone C est une manifestation du mouvement des plaques ?**

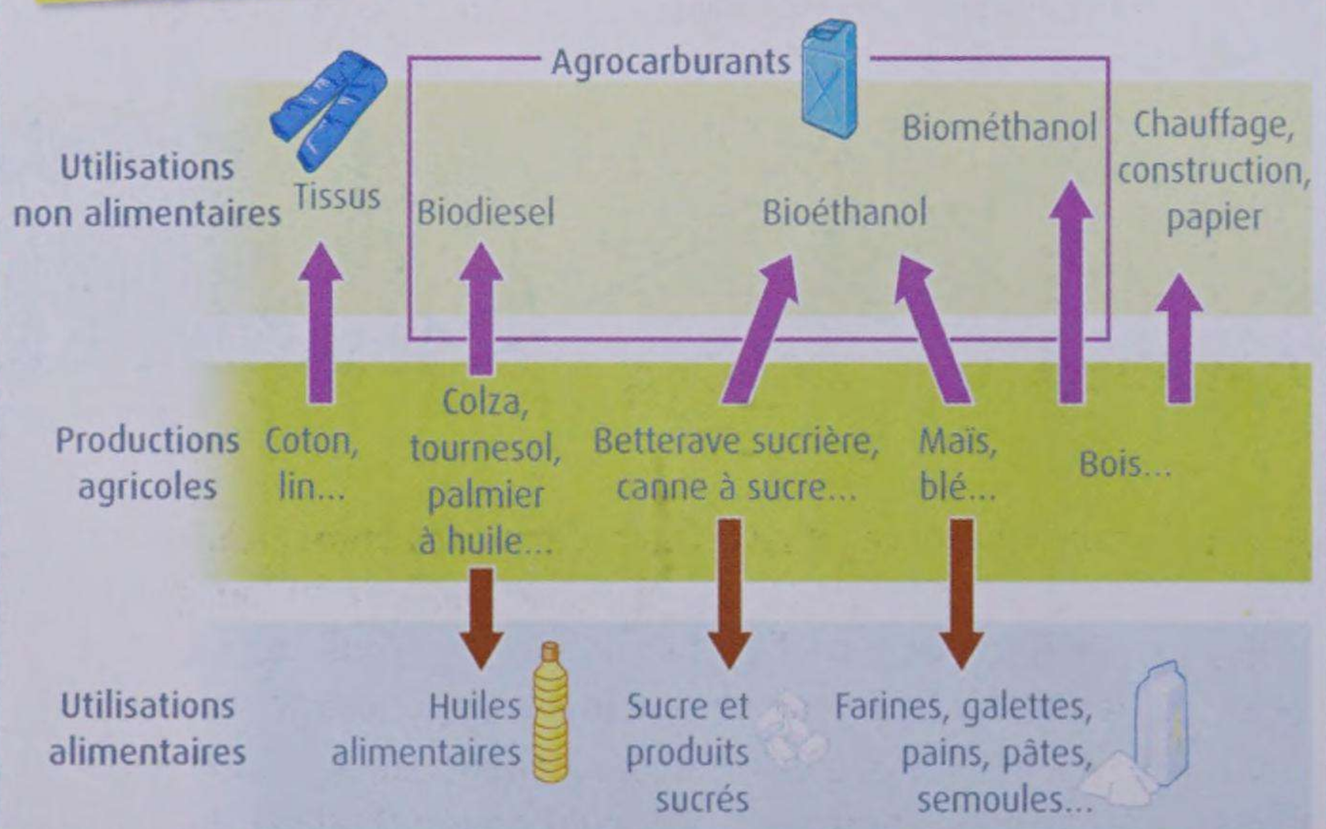
mots clés

Dorsale : chaîne de montagnes sous-marine, lieu de production de la lithosphère océanique par magmatisme.

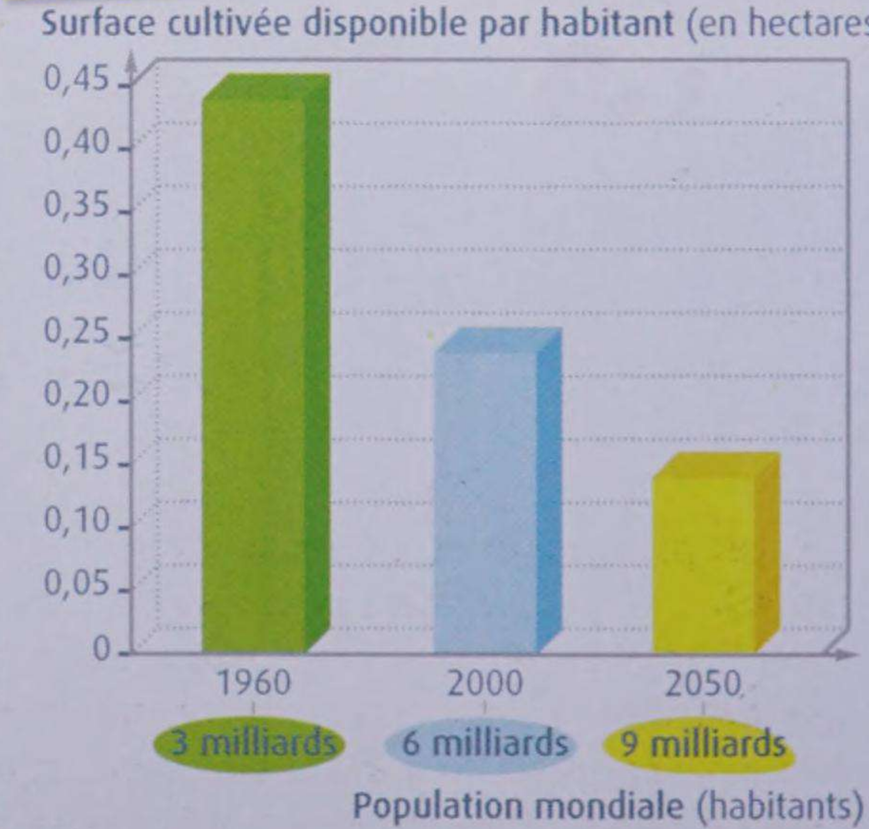
Point chaud : zone à forte activité volcanique, résultant de l'ascension d'un panache mantellique sous-jacent.

2. Quelles sont les utilisations de la biomasse végétale par l'Homme ?

Exemples d'utilisations directes des plantes cultivées



Évolution de la surface de terres cultivables par habitant



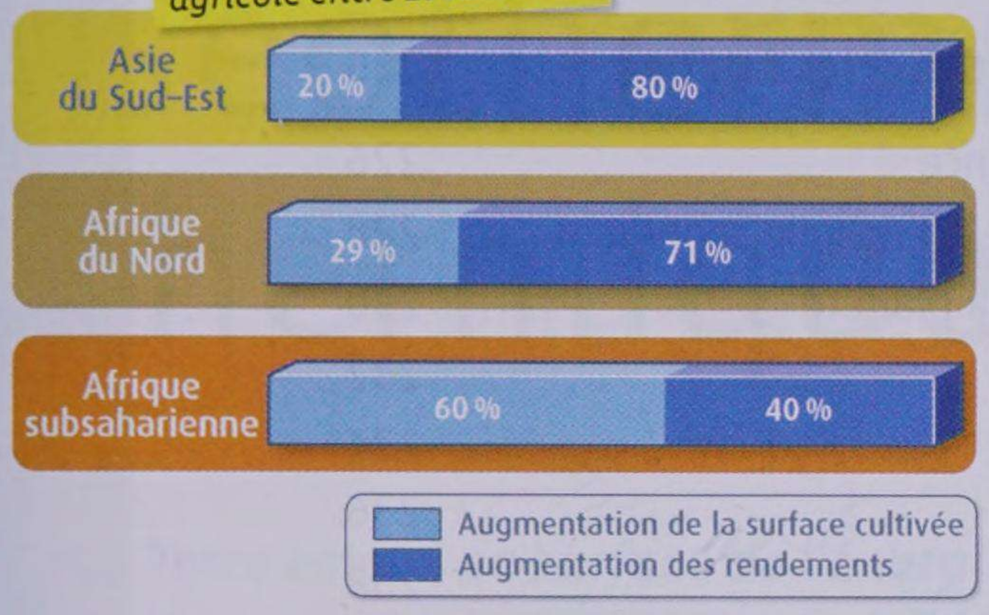
1. **Citez quelques utilisations directes et indirectes des plantes cultivées par l'Homme.**
2. **Indiquez ce qui caractérise un agrosystème comparé à un écosystème.**
3. **Indiquez l'enjeu majeur auquel l'humanité devra faire face en 2050.**

Agrosystème : écosystème aménagé et géré par l'Homme afin d'y produire des matières animales ou végétales à des fins alimentaires, industrielles ou énergétiques (agrocarburants).

Intrant : en agriculture, désigne l'énergie et les substances introduites dans un agrosystème par l'Homme (pétrole, eau, engrais, produits phytosanitaires, etc.).

3. Comment produire en préservant l'environnement ?

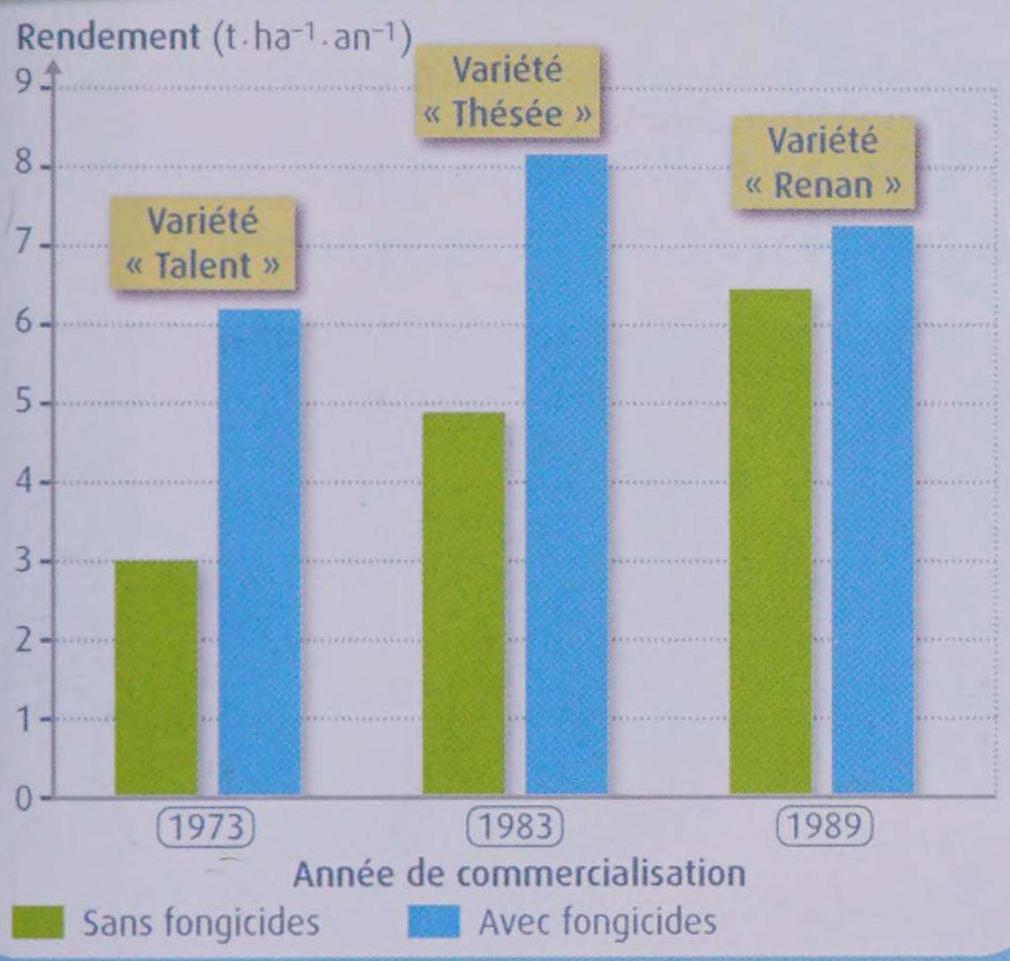
Origine de l'augmentation de la production agricole entre 1961 et 2000



Comparaison de 3 pratiques agricoles (pour le blé)

	Intensif	Intégré	Biologique
Rendements ($t.ha^{-1}.an^{-1}$)	9,8	8,9	5,0
Revenu net ($€.ha^{-1}.an^{-1}$)	778	847	1045
Temps de travail ($h.ha^{-1}.an^{-1}$)	7 h 06	6 h 18	6 h 13
Indice d'utilisation des produits phytosanitaires (UA)	75	38	0
Consommation d'énergie ($MJ.ha^{-1}.an^{-1}$)	15,9	13,5	8,0

Rendements de 3 variétés de blé



1 **Nommez deux solutions qui permettraient en théorie de satisfaire les besoins alimentaires mondiaux en 2050.**

2 **Dégagez les avantages et inconvénients des 3 pratiques agricoles citées.**

3 **Montrez que le choix de la variété végétale cultivée est une solution au défi alimentaire.**

Rendement : biomasse utile produite par unité de surface et de temps ($kg.ha^{-1}.an^{-1}$).
Variété cultivée : groupe d'individus, de la même espèce cultivée, qui présentent des caractères communs.

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 4

Les **plaques lithosphériques** divergent au niveau des **dorsales**. Elles convergent dans les zones de **subduction**, où la lithosphère océanique, produite au niveau des dorsales par magmatisme, plonge sous la lithosphère continentale. Ces mouvements sont responsables d'une importante **activité sismique et volcanique** aux frontières des plaques. Des alignements volcaniques intraplaques existent aussi. Ils sont la trace du déplacement de plaques lithosphériques au-dessus d'un panache mantellique fixe, induit par des mouvements de convection dans le **manteau**.

Les **plantes** sont à la base de toute l'**alimentation humaine**, soit de façon directe, soit sous forme d'alimentation animale (utilisation indirecte). Elles servent aussi à la fabrication de textiles, de matériaux de construction, de combustibles et d'agrocarburants, notamment. La production agricole végétale est assurée par des **agrosystèmes** qui se caractérisent par : une biomasse végétale surtout exportée (récoltée) ; un flux de matière organique recyclée très réduit ; l'introduction plus ou moins importante d'intrants.

L'humanité est face au défi d'augmenter la production alimentaire d'environ 70%, pour nourrir 9 milliards d'individus en 2050. Deux solutions permettraient de satisfaire les besoins alimentaires en 2050 : augmenter la **surface cultivée** (mais les limites sont bientôt atteintes) et les **rendements**, dans une perspective de **développement durable**. Certaines pratiques agricoles limitent (agriculture intégrée) ou suppriment (agriculture biologique) les **intrants chimiques**. Elles incluent l'utilisation de certaines **variétés végétales**, à rendements élevés en l'absence d'intrants.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Géothermie et propriétés thermiques de la Terre 225

UNITÉ 1 L'exploitation de l'énergie géothermique en France 226
UNITÉ 2 Origine et utilisation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale 228
UNITÉ 3 Le transfert de l'énergie thermique au sein de la planète 230
UNITÉ 4 La Terre, machine thermique 232
Bilan des unités 234
L'essentiel 236
Exercices 238

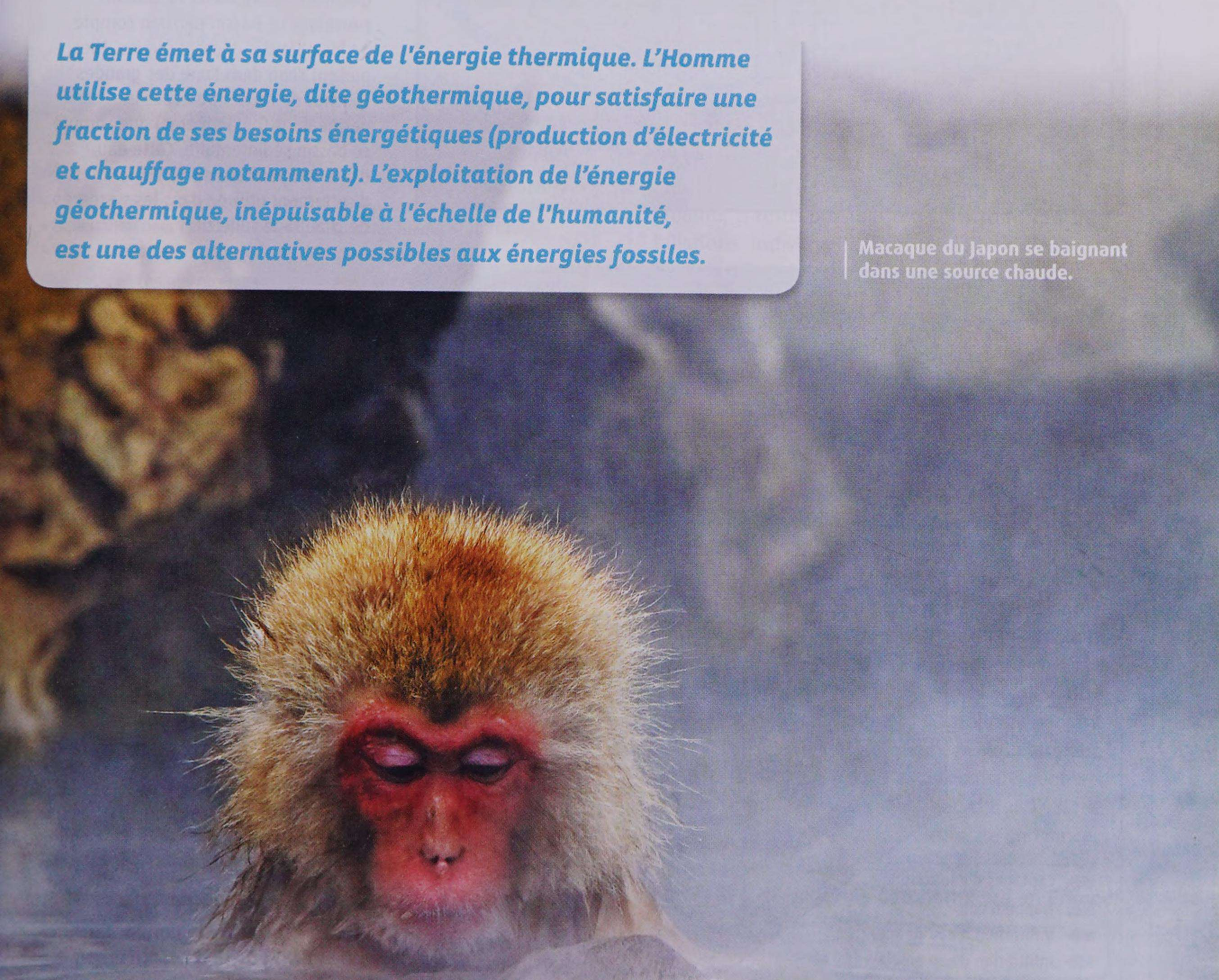
CHAPITRE 2 La plante domestiquée 241

UNITÉ 1 L'origine des espèces cultivées 242
UNITÉ 2 Les bases génétiques de la domestication 244
UNITÉ 3 La sélection variétale 246
UNITÉ 4 Techniques de croisement et biodiversité cultivée 248
UNITÉ 5 Génie génétique et plantes cultivées 252
Bilan des unités 252
L'essentiel 254
Exercices 256
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 258
ATELIERS D'EXPLORATION ENQUÊTE – MÉTIER – ART ET SCIENCE – ENQUÊTE 260

CHAPITRE 1

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

La Terre émet à sa surface de l'énergie thermique. L'Homme utilise cette énergie, dite géothermique, pour satisfaire une fraction de ses besoins énergétiques (production d'électricité et chauffage notamment). L'exploitation de l'énergie géothermique, inépuisable à l'échelle de l'humanité, est une des alternatives possibles aux énergies fossiles.



Macaque du Japon se baignant dans une source chaude.

Comment exploite-t-on l'énergie géothermique ? Quels processus produisent l'énergie géothermique ?

UNITÉ 1

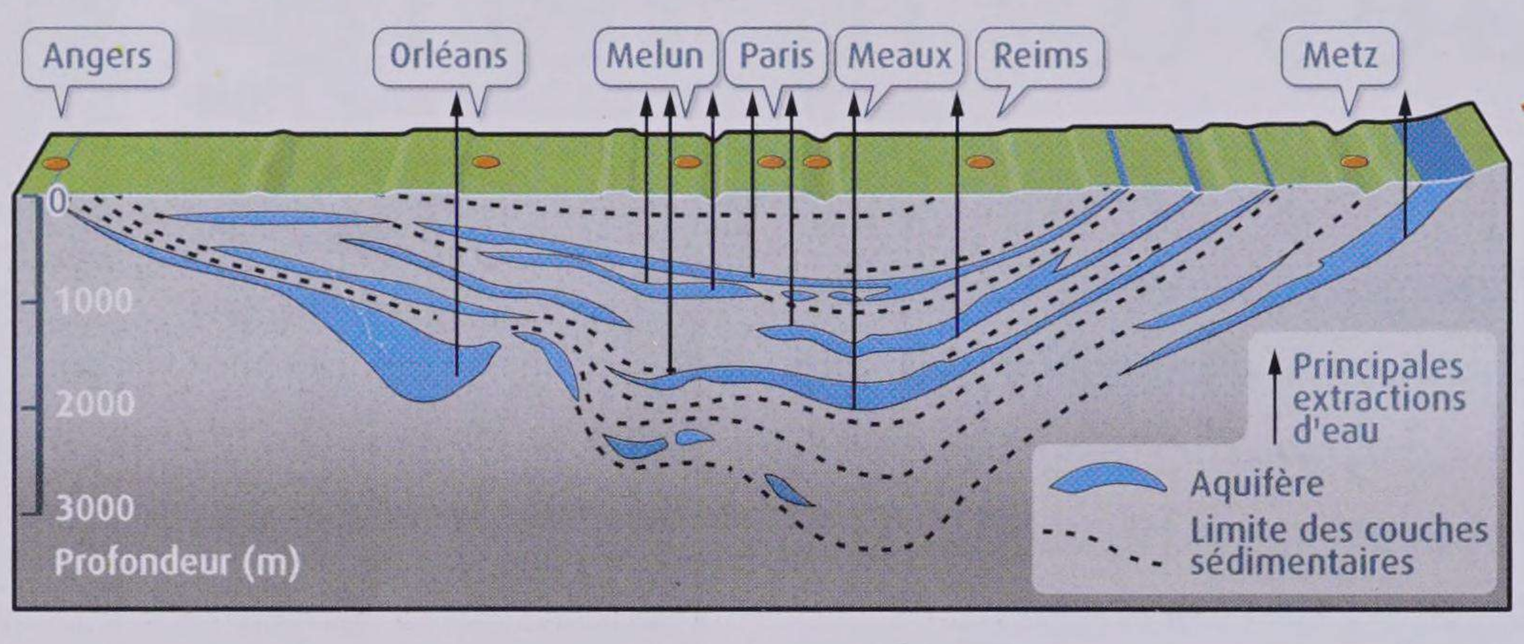
L'exploitation de l'énergie géothermique en France

L'énergie thermique en provenance des profondeurs de la Terre (énergie géothermique) est utilisée depuis l'Antiquité. Son exploitation connaît aujourd'hui un essor non négligeable.

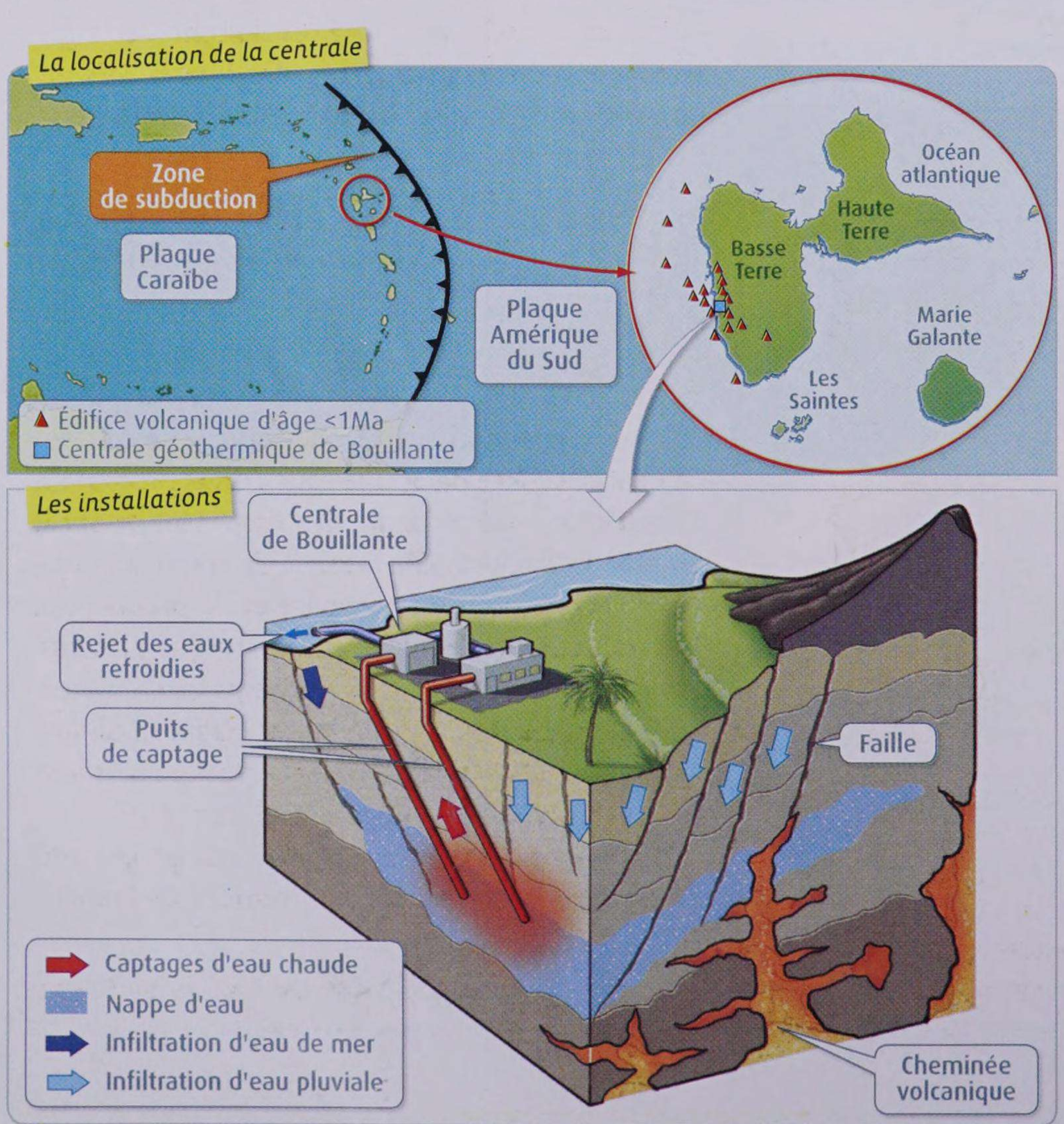
Où et comment exploite-t-on l'énergie géothermique en France ?

Deux exemples d'utilisation de l'énergie géothermique

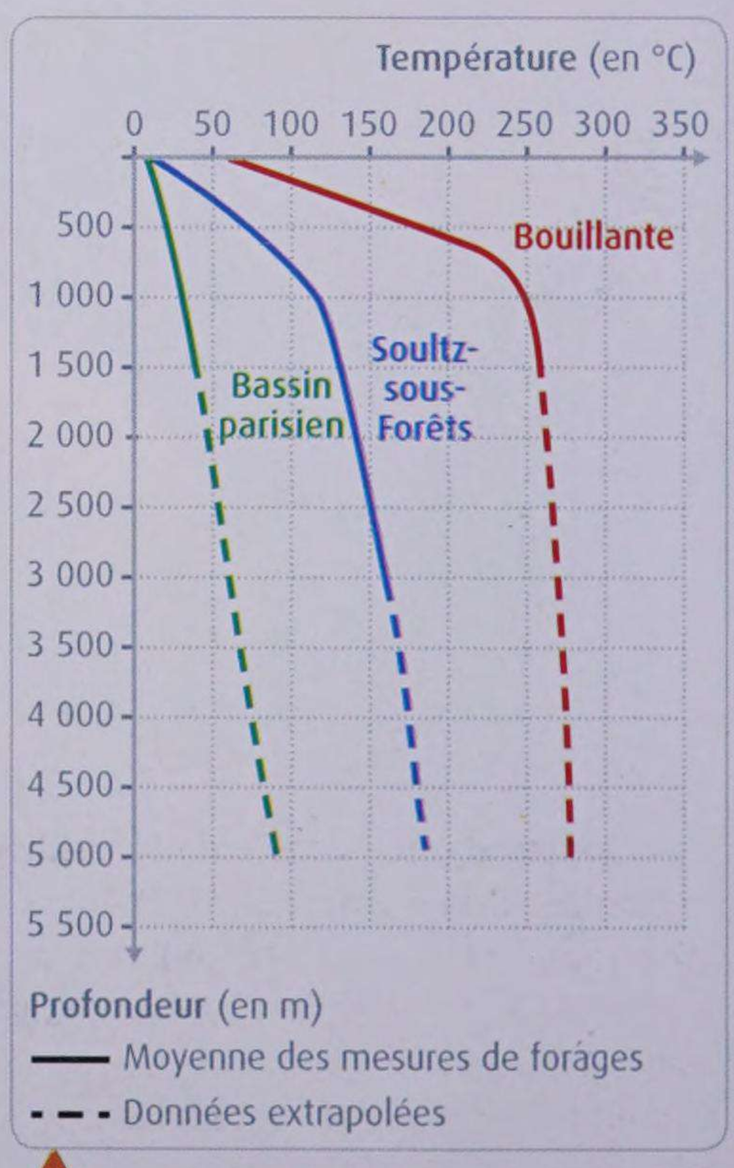
SORTIE DE TERRAIN



1 L'exploitation de l'énergie géothermique dans le Bassin parisien. Le Bassin parisien compte 34 installations géothermiques. Elles puisent l'eau dans l'une des grandes couches de roches poreuses et perméables (ou aquifères) que compte ce bassin sédimentaire. Cette eau, d'une température de 56 à 85 °C, est directement utilisée dans les systèmes de chauffage collectif.

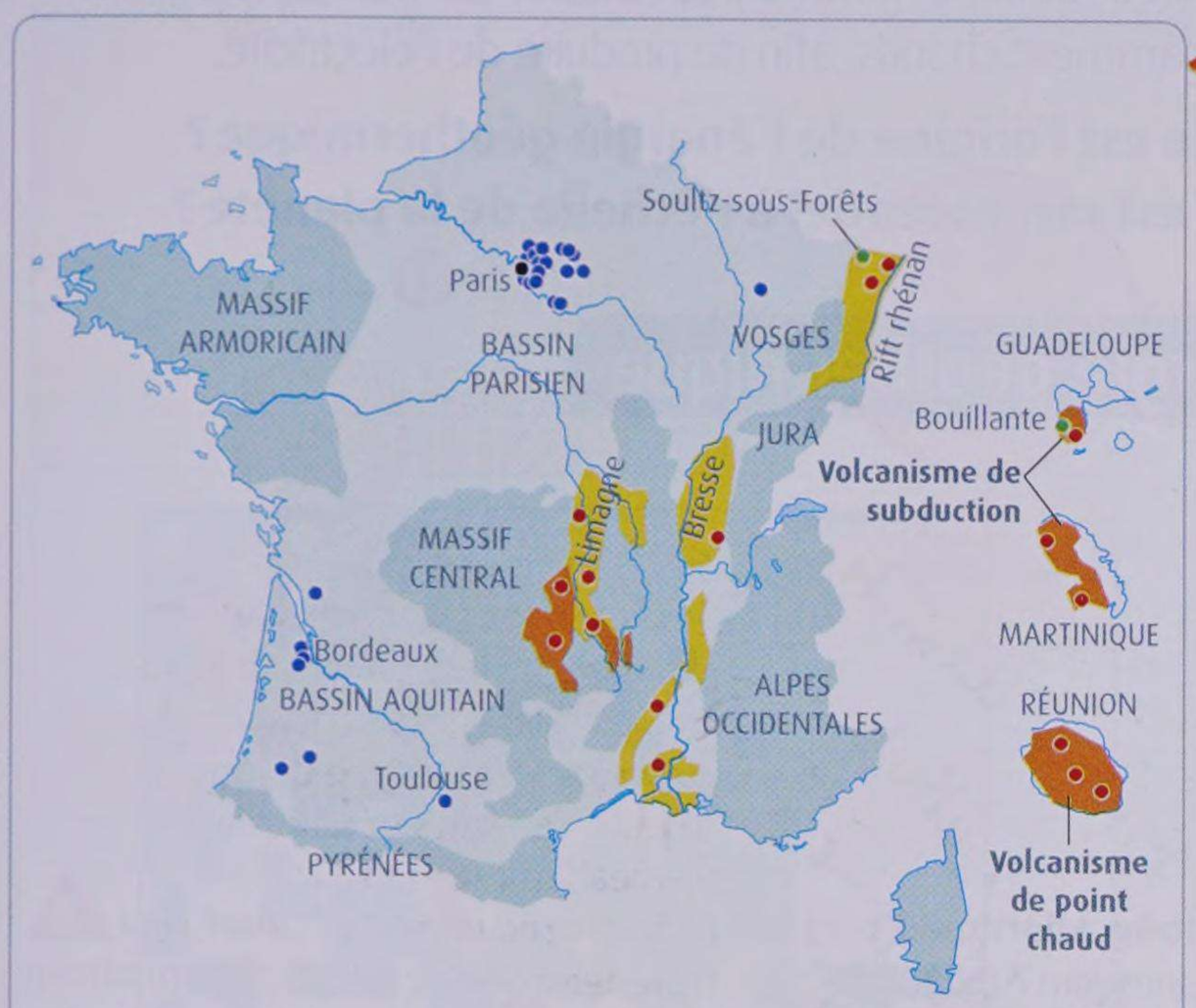


2 La centrale électrique de Bouillante en Guadeloupe. La centrale de Bouillante est la première installation qui, en France, a commercialisé de l'électricité produite grâce à l'énergie géothermique. Elle couvre environ 7 % des besoins en électricité de la Guadeloupe. L'eau, captée à 1 000 m de profondeur, atteint 250 °C. Elle provient de l'infiltration de l'eau de mer et de l'eau de pluie à travers un réseau de failles. Au cours de sa remontée, elle se transforme en vapeur qui, dans la centrale, met en mouvement une turbine puis un alternateur produisant de l'électricité.



3 Évolution de la température en fonction de la profondeur, ou géotherme, dans le Bassin parisien, à Bouillante et à Soultz-sous-Forêts (voir doc. 4). Sous les continents, l'augmentation de température avec la profondeur (gradient géothermique) est en moyenne de 30 °C.km^{-1}. À Soultz et à Bouillante, le gradient entre 0 et – 1000 m est respectivement de 120 et 250 °C.km^{-1}.

État de la ressource géothermique et potentiel de développement



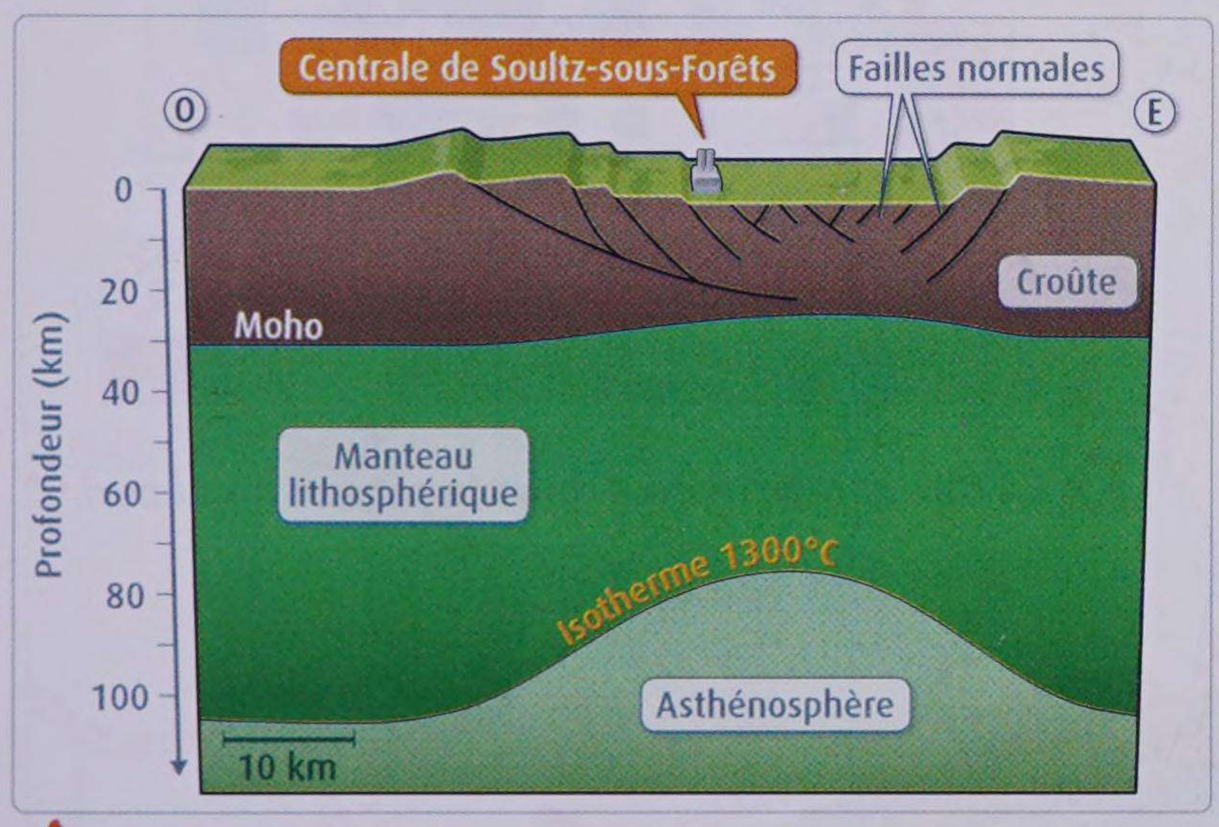
4 Carte géologique simplifiée présentant les exploitations géothermiques de grande taille pour le chauffage collectif et l'électricité.

Interview de **Jacques Varet**, conseiller de direction au BRGM.

Les bassins sédimentaires contiennent d'importantes réserves d'eaux chaudes. Leur exploitation pour le chauffage collectif permet d'économiser $4{,}5.10^{14}$ J d'électricité par an, ce qui évite le rejet de plus de 400 000 tonnes de CO_2. Il est possible d'en faire beaucoup plus : si les réserves d'eau géothermale sont moins bien connues dans les régions où le socle cristallin affleure, il reste possible d'y construire des installations individuelles qui exploitent l'énergie géothermique récupérée par des fluides mis en circulation dans le sol à très faible profondeur.

Interview de **Albert Genter**, ingénieur géologue à Soultz-sous-Forêts.

En métropole, les rifts présentent un fort potentiel pour la production d'électricité géothermique car le gradient géothermique y est élevé. La centrale pilote de Soultz-sous-Forêts produit de l'électricité à partir de fluides traversant le socle granitique fracturé. Elle permet de tester de nouvelles technologies de pompage et de production. La production d'électricité géothermique présente l'intérêt d'être stable dans le temps et d'émettre 10 fois moins de CO_2 que les techniques utilisant les combustibles fossiles. Mais elle ne peut satisfaire seule les besoins mondiaux : l'électricité géothermique mondiale représente aujourd'hui 14 % de la consommation annuelle d'électricité en France.



5 Contexte géologique de la centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts : le rift rhénan. Il y a 35 Ma, une phase d'extension de la lithosphère continentale s'est produite en Europe de l'Ouest. Ce phénomène s'est accompagné d'une remontée de l'asthénosphère et d'une activité magmatique. Plusieurs fossés d'effondrement, ou rifts, sont les témoins de ce processus.

6 Potentiel de l'énergie géothermique en France.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 2.** Indiquez comment l'Homme peut prélever l'énergie géothermique et le paramètre qui détermine l'utilisation qu'il peut en faire.
2. **DOC. 1 À 5.** Identifiez les contextes géodynamiques français favorables à l'exploitation de l'énergie géothermique et précisez leurs particularités.
3. **DOC. 4 ET 6.** Discutez de quelques points forts et points faibles pour l'exploitation de l'énergie géothermique en France.
4. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les différentes utilisations de l'énergie géothermique en France et précisez les contextes géodynamiques où chaque type d'utilisation est envisageable.

UNITÉ 2

Origine et utilisation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale

L'énergie géothermique chauffe les roches en profondeur et les fluides qui y circulent. La température de ces fluides varie d'un endroit à l'autre. L'Homme peut utiliser ces fluides, lorsqu'ils sont suffisamment chauds, afin de produire de l'électricité.

Quelle est l'origine de l'énergie géothermique ? Quel est son potentiel à l'échelle de la planète ?

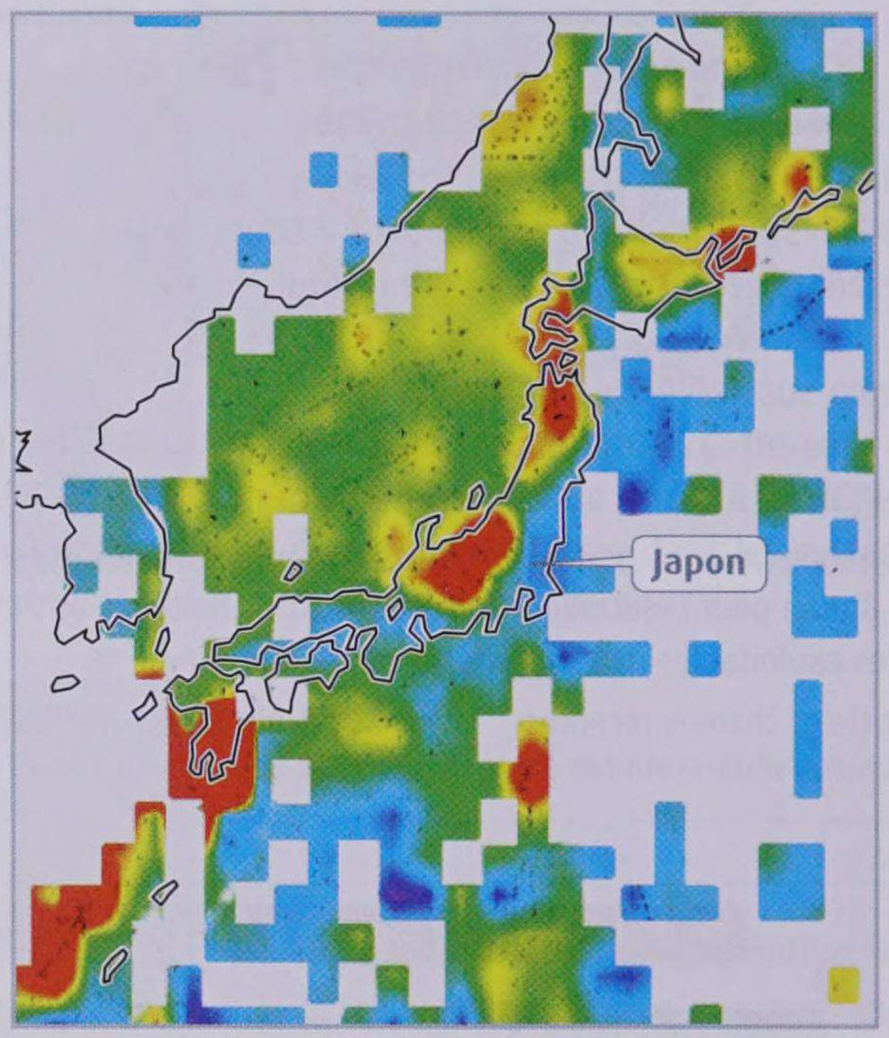
Origine et flux en surface de l'énergie géothermique

Les différentes enveloppes terrestres contiennent des éléments radioactifs : uranium (^{238}U et ^{235}U), thorium (^{232}Th) et potassium (^{40}K). Leur désintégration produit de l'énergie thermique : $9{,}94.10^{-5}$ $W.kg^{-1}$ pour ^{238}U et ^{235}U réunis ; $2{,}69.10^{-5}$ $W.kg^{-1}$ pour ^{232}Th ; $2{,}79.10^{-5}$ $W.kg^{-1}$ pour ^{40}K ($1W = 1\,J.s^{-1}$). Cette source d'énergie interne – inépuisable à l'échelle de l'humanité – est à l'origine de 50 à 75 % de l'énergie thermique dissipée par la Terre.

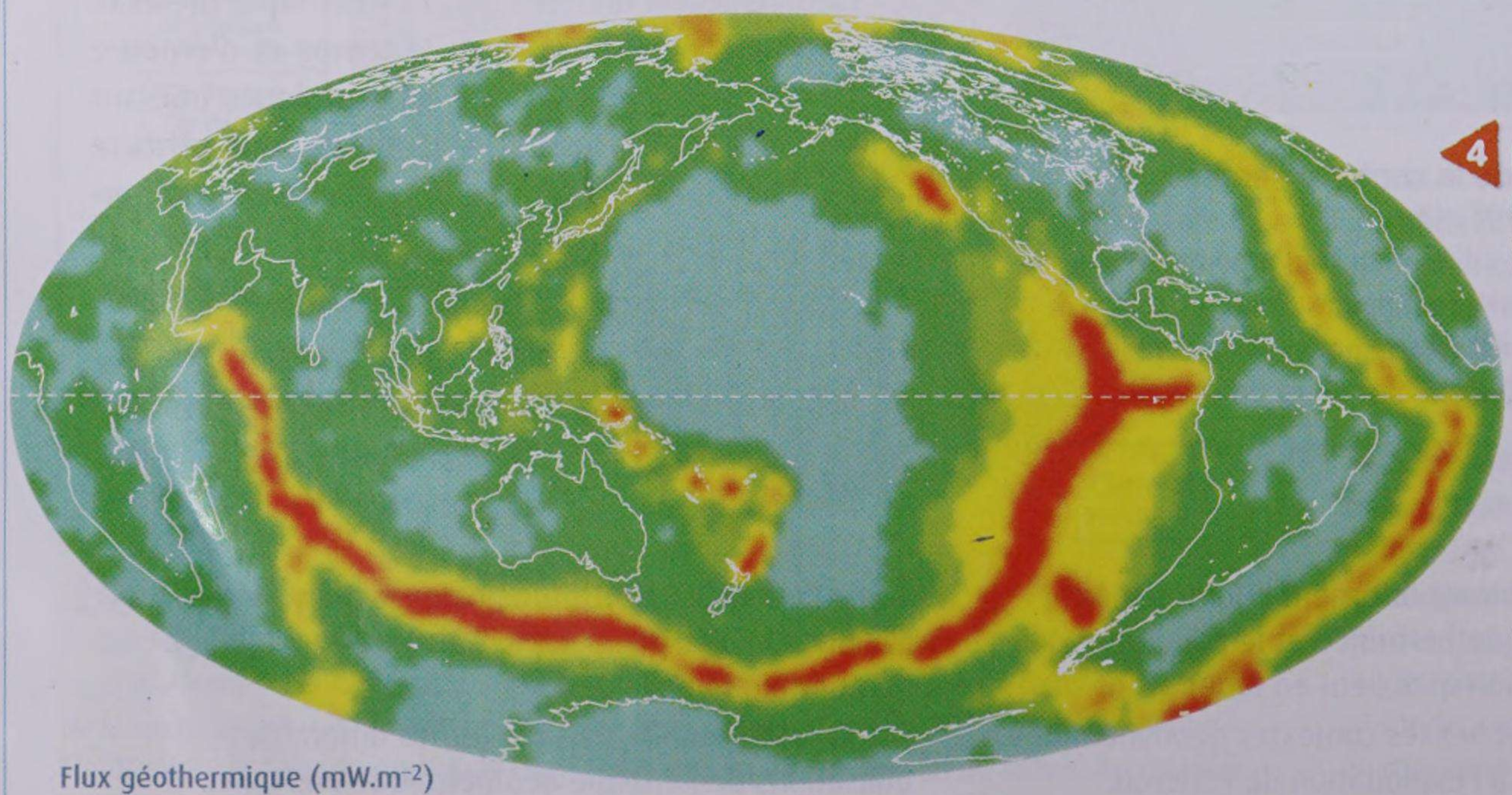
1 La principale source d'énergie interne de la Terre.

Enveloppes	Masse (en kg)	Concentrations des éléments (en ppm)		
		^{238}U et ^{235}U	^{232}Th	^{40}K
Croûte continentale	$1{,}38.10^{22}$	1,60	5,80	2,38
Croûte océanique	$6{,}90.10^{21}$	$9{,}00.10^{-1}$	2,70	$4{,}76.10^{-1}$
Manteau	$4{,}00.10^{24}$	$2{,}70.10^{-2}$	$9{,}40.10^{-2}$	$3{,}90.10^{-2}$
Noyau	$1{,}99.10^{24}$	$1{,}00.10^{-5}$	$1{,}00.10^{-4}$	$1{,}19.10^{-4}$

2 Concentration en éléments radioactifs dans les enveloppes terrestres. Ppm signifie « partie pour million » : 1 ppm d'uranium = 1 mg d'uranium par kg de roche.

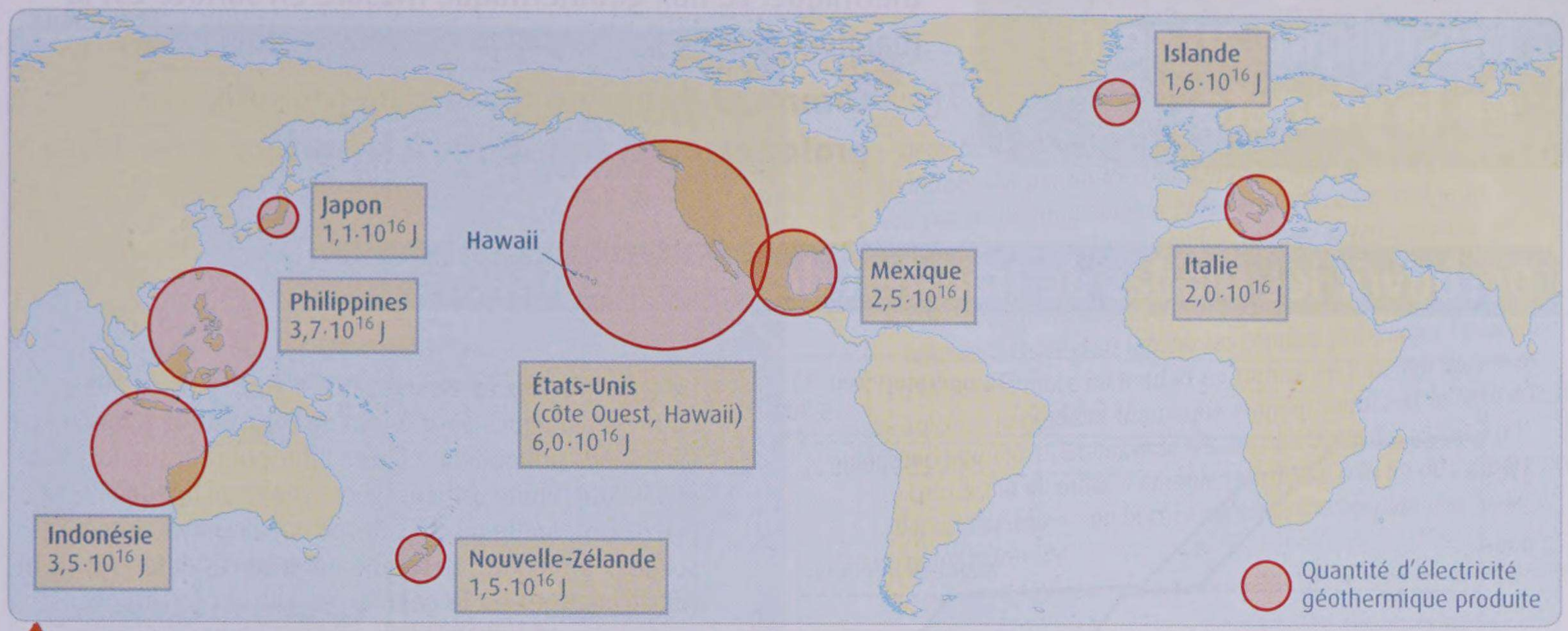


3 Le flux géothermique dans la région du Japon.

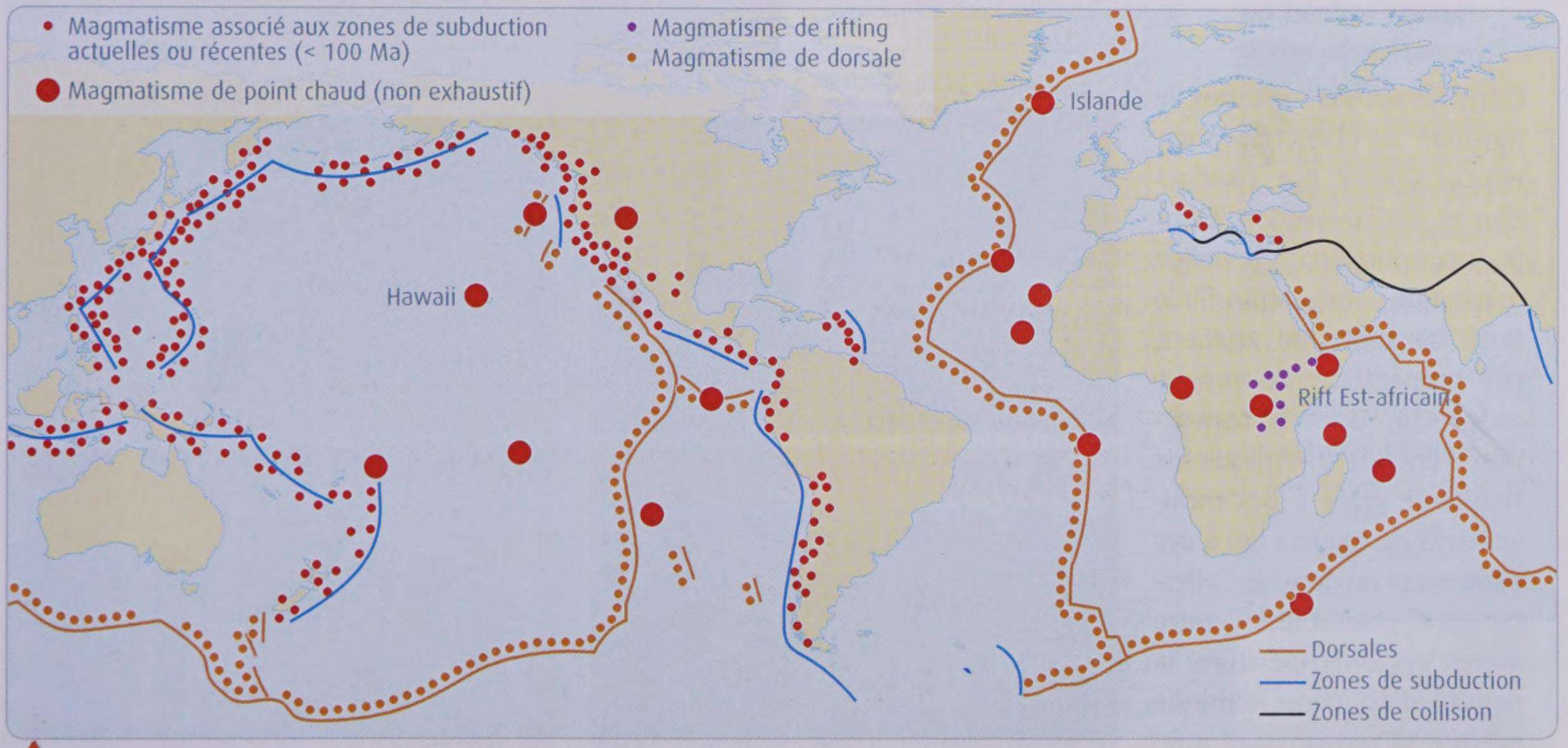


4 Le flux géothermique mondial. L'énergie thermique produite en profondeur est dissipée en surface. Le flux géothermique (en $mW.m^{-2}$) est une mesure de la quantité d'énergie géothermique dissipée par unité de temps et de surface. Le flux moyen est de 60 $mW.m^{-2}$. La superficie de la Terre est de 510.10^6 km^2.

La production mondiale d'électricité géothermique



5 Les huit premiers pays producteurs d'électricité géothermique en 2010. $2{,}42.10^{17}$ J d'électricité d'origine géothermique ont été produits dans le monde en 2010. En moyenne, 5 J d'énergie géothermique sont nécessaires pour produire 1 J d'énergie électrique. Lors d'un congrès qui s'est tenu à Bali (Indonésie) en 2010, les spécialistes de la géothermie ont estimé que la production d'électricité d'origine géothermique pourrait atteindre $4{,}2.10^{18}$ J en 2050.



6 Principales zones à activité magmatique actuelle ou récente dans le monde. L'est de l'Afrique est actuellement le théâtre d'une extension de la lithosphère continentale, à l'origine de la formation d'un rift. Ce phénomène est associé à un magmatisme, dit de rifting (voir doc. 5 p. 227). Quant au magmatisme de point chaud, il se manifeste aussi bien en milieu continental qu'océanique.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 ET 2.** Calculez l'énergie thermique produite par chacune des enveloppes terrestres. Concluez.
2. **DOC. 3, 4 ET 6.** Identifiez les contextes géodynamiques où le flux géothermique est le plus important.
3. **DOC. 4 ET 5.** Calculez la quantité d'énergie géothermique prélevée en 2010 pour la production d'électricité. Comparez avec la quantité totale d'énergie thermique dissipée et concluez.
4. **DOC. 5 ET 6.** Produisez une carte des principales zones favorables à la production d'électricité géothermique dans le monde et précisez si toutes ces zones sont exploitées.
5. **EN CONCLUSION.** Expliquez l'origine de l'énergie géothermique et discutez de son potentiel d'exploitation à l'échelle de la planète.

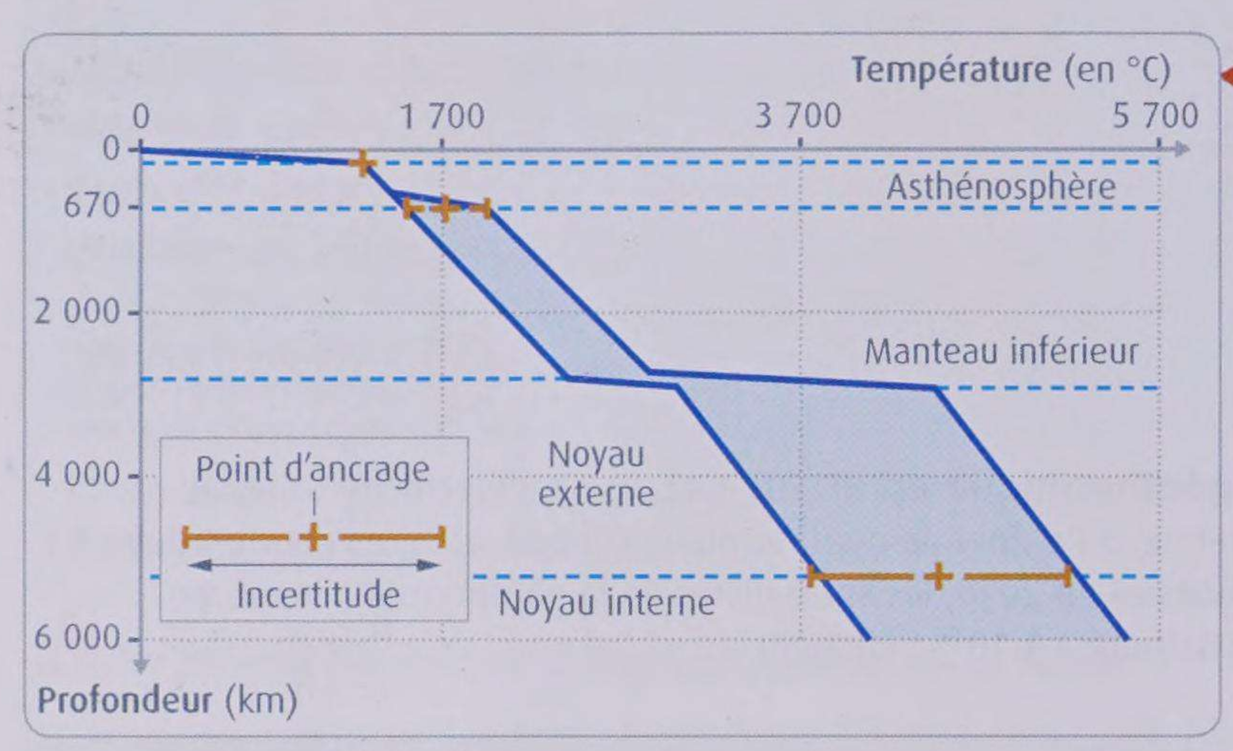
UNITÉ 3

Le transfert de l'énergie thermique au sein de la planète

La désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches est à l'origine d'une production importante d'énergie thermique. Le flux géothermique mesuré en surface est la manifestation de la dissipation de cette énergie interne.

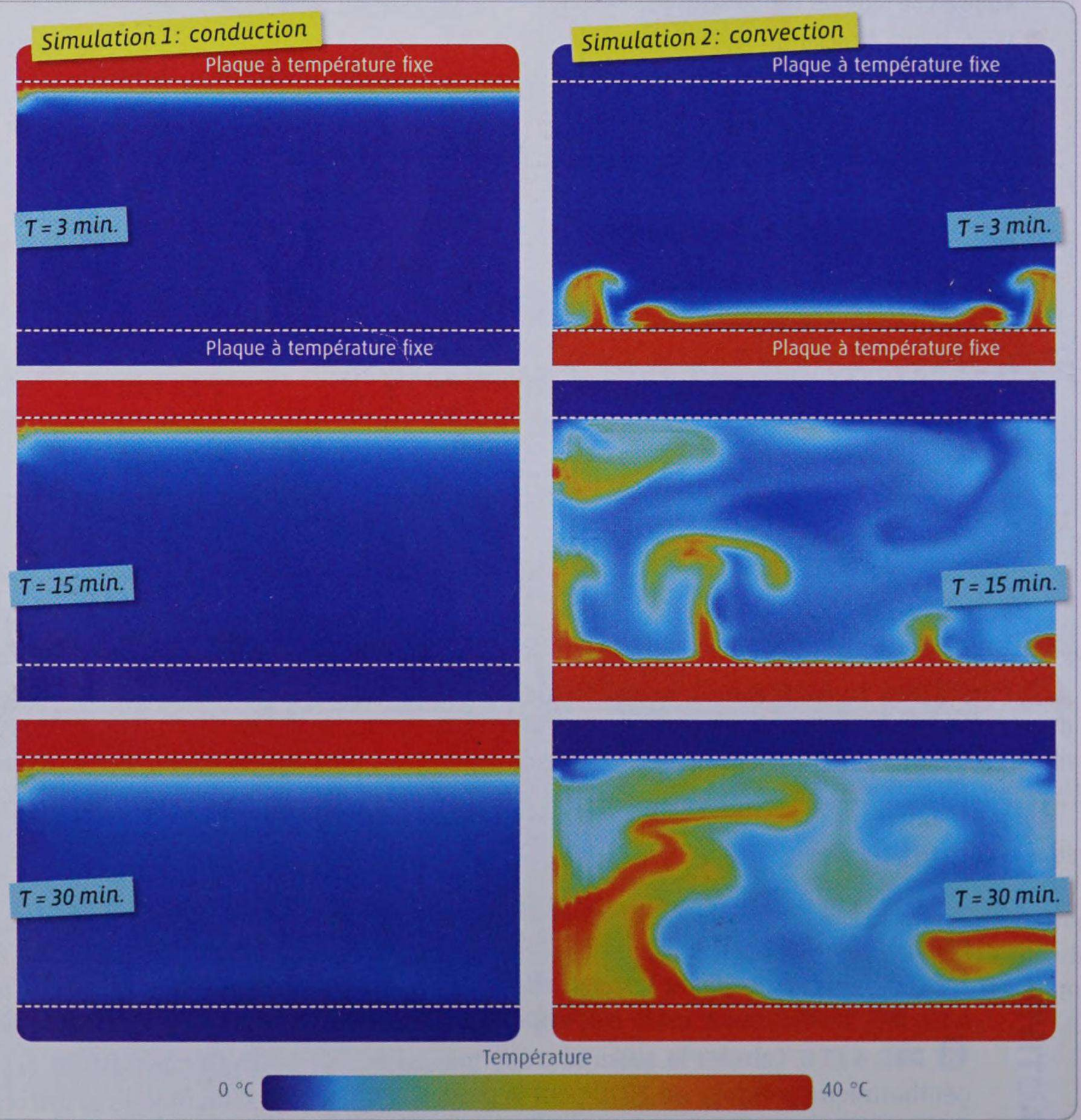
Comment l'énergie thermique produite en profondeur est transférée à la surface de la Terre ?

Découvrir les modes de transfert de l'énergie thermique



1 Le géotherme terrestre. Des données physiques ou minéralogiques permettent de connaître la température à certaines profondeurs : limite lithosphère-asthénosphère (– 150 km), limite asthénosphère-manteau inférieur (– 670 km), limite noyau externe liquide-noyau interne solide (– 5 100 km). La courbe qui relie ces différents points (dits d'ancrage) est le géotherme. Elle est construite sur la base d'hypothèses concernant le mode de transfert de l'énergie thermique.

Dans les roches terrestres, le transfert de l'énergie thermique s'opère par conduction et par convection. Dans la conduction, l'énergie thermique est transférée sans transport de matière, par propagation de proche en proche. Dans la convection, l'énergie thermique est transférée grâce à des mouvements de matière liés à des différences de densité. Celles-ci sont contrôlées, entre autres, par la température : la densité d'un corps diminue lorsque sa température augmente. La convection au sein des roches dépend aussi de leur capacité à s'écouler, c'est-à-dire de leur viscosité. Ci-contre, on a réalisé une modélisation numérique de l'évolution de la température au cours du temps dans un fluide en contact avec deux plaques dont la température est fixée.



2 Modélisation numérique des transferts de l'énergie thermique par conduction et par convection.

Réaliser des mesures de la conduction et de la convection

Montage 1

Montage 2

JE MANIPULE

▸ *Deux béchers sont remplis d'une même quantité d'eau qui est chauffée, soit par un thermoplongeur placé au fond (montage 1), soit par un thermoplongeur placé en surface (montage 2).*

▸ *À l'aide de deux thermosondes, relevez la température en surface et au fond de l'eau toutes les 30 secondes.*

▸ *Pour chaque montage :*

– affichez à l'aide d'un tableur les courbes présentant l'évolution de la température au fond et en surface en fonction du temps.

– calculez le gradient thermique entre la surface et le fond à la fin de l'expérience. Exprimer le résultat en $°C.cm^{-1}$.

– calculez la quantité d'énergie transférée à la fin de l'expérience, depuis l'extrémité du bécher où est le thermoplongeur jusqu'à l'autre extrémité.

Mesures de température

Temps (sec.)	Sonde 1 (au fond)	Sonde 2 (en surface)
30	21,7/18,4	19/23,1
60	25,9/18,5	19,7/29,2
90	27,5/18,5	21,8/34,5
120	31,7/18,6	23,2/39,8
150	45,3/18,7	26,4/35,6
180	40,4/18,7	30/49,1
210	43,2/18,8	33,9/54,9
240	46,6/18,8	36,3/58,7
270	50,8/18,9	38,8/63,4
300	54,1/18,9	41,5/67
330	63,2/19	44,1/72,2
360	60,5/19	48,4/76,3
390	63,2/19,1	51,2/80
420	66,2/19,1	55,8/84,9
450	68,9/19,2	58,3/87,6
510	74,9/19,3	67,1/95,1
540	77,2/19,5	71,4/99,2
570	80,4/19,8	74,5/99,7
600	83,9/20	78,6/100

3 L'évolution de la température dans un bécher rempli d'eau chauffée soit par le haut, soit par le bas. Ces résultats ont été obtenus pour un volume d'eau de 1 L et des thermosondes distantes de 10 cm à leurs extrémités. Les chiffres en rouge correspondent au montage 1, les chiffres en noir au montage 2.
La quantité d'énergie Q échangée (en J) lorsqu'une masse d'eau m_{eau} passe de la température T_i à la température T_f est donnée par la formule suivante : $Q = m_{eau} \times C_{eau} \times (T_f - T_i)$, où C_{eau} est la capacité thermique massique de l'eau. Entre 0 °C et 100 °C, $C_{eau} = 4180\ J.kg^{-1}.°C^{-1}$

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Décrivez le géotherme terrestre.

2 **DOC. 2 ET 3.** Déterminez le mode de transfert de l'énergie thermique dans chaque montage du doc. 3.

3 **DOC. 3.** À l'aide du calcul proposé, déterminez quel mode de transfert de l'énergie thermique est le plus efficace et trouvez la relation entre le gradient thermique et l'efficacité du transfert.

4 **DOC. 1 ET 3.** Formulez une hypothèse quant au mode de transfert de l'énergie thermique dans la lithosphère et dans le manteau sous-jacent.

5 **EN CONCLUSION.** Expliquez comment l'énergie thermique produite en profondeur peut être transférée à la surface de la Terre.

UNITÉ 4

La Terre, machine thermique

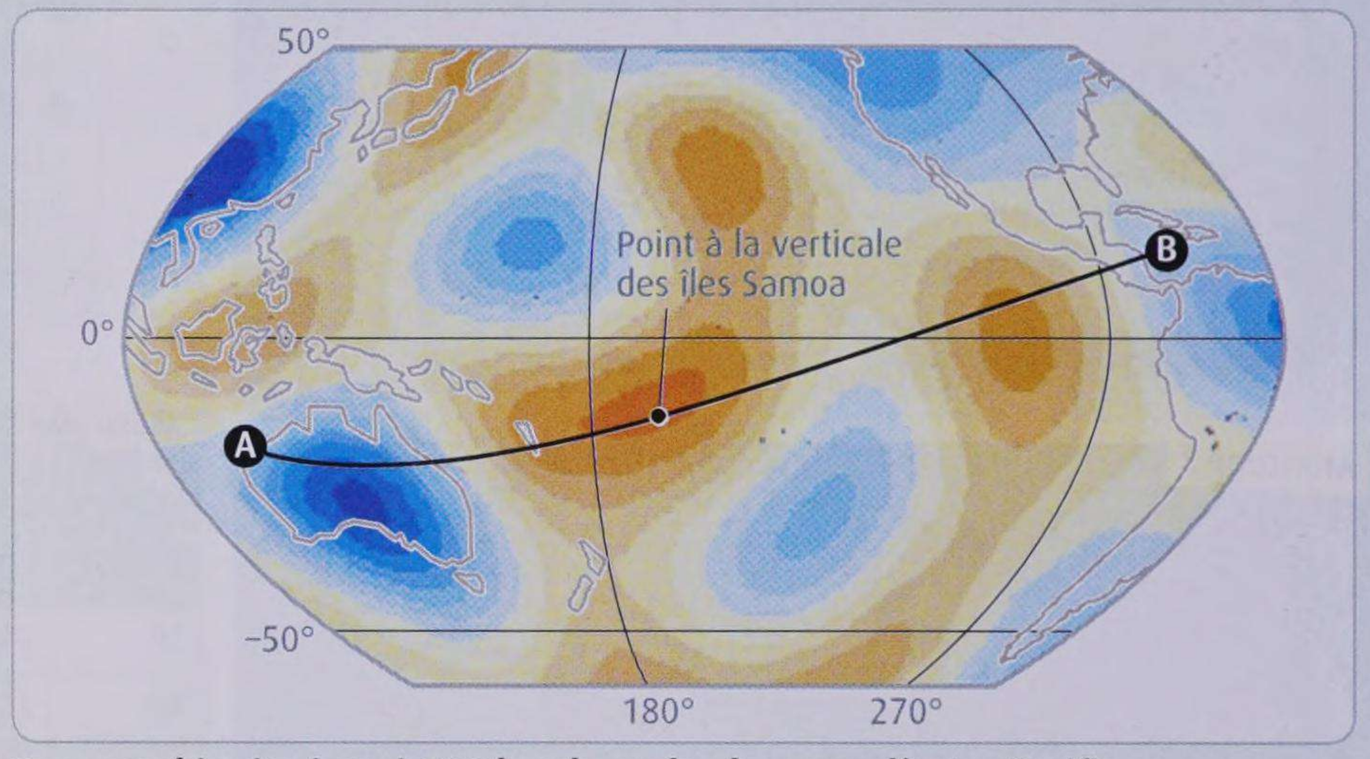
La Terre dissipe de l'énergie thermique par conduction dans la lithosphère et essentiellement par convection dans le manteau sous-jacent.

Comment s'organisent les mouvements de convection et quelles sont leurs conséquences à l'échelle de la planète ?

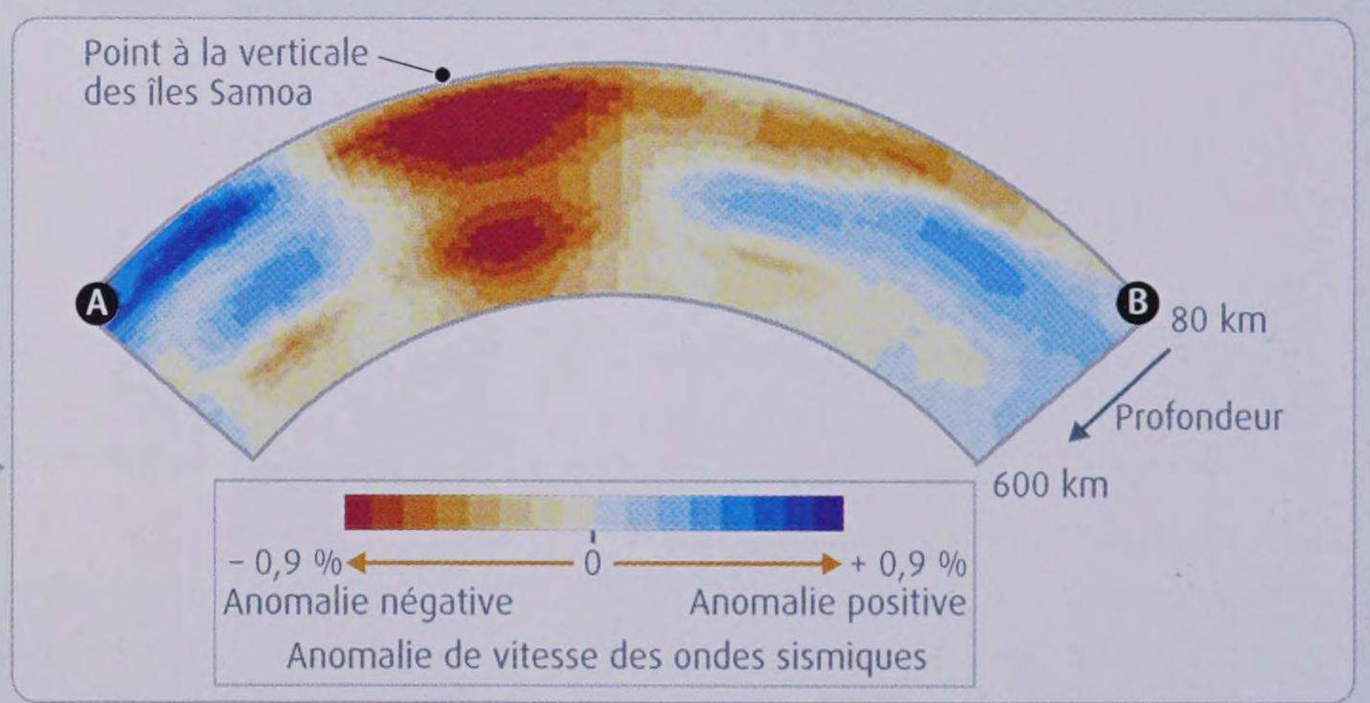
Observer la convection mantellique

La tomographie sismique permet de visualiser les hétérogénéités de température dans le manteau (voir p. 376 le principe de la méthode). On rappelle que la vitesse de propagation des ondes sismiques diminue quand la température du matériau traversé augmente. Une anomalie de vitesse positive correspond à une arrivée précoce des ondes sismiques par rapport au temps théorique prévu. Une anomalie de vitesse négative correspond à un retard de l'arrivée des ondes sismiques par rapport au temps théorique prévu.

Les îles Samoa présentent un important magmatisme de point chaud.

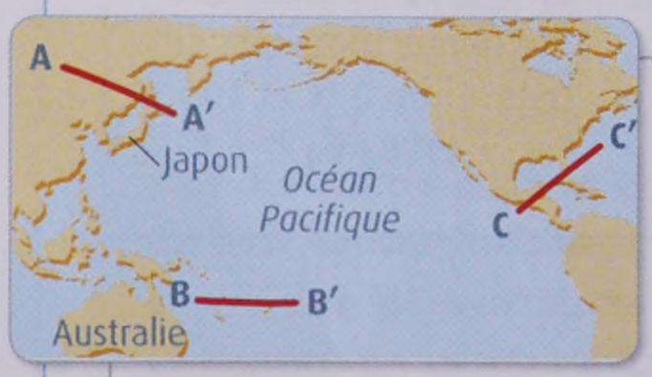


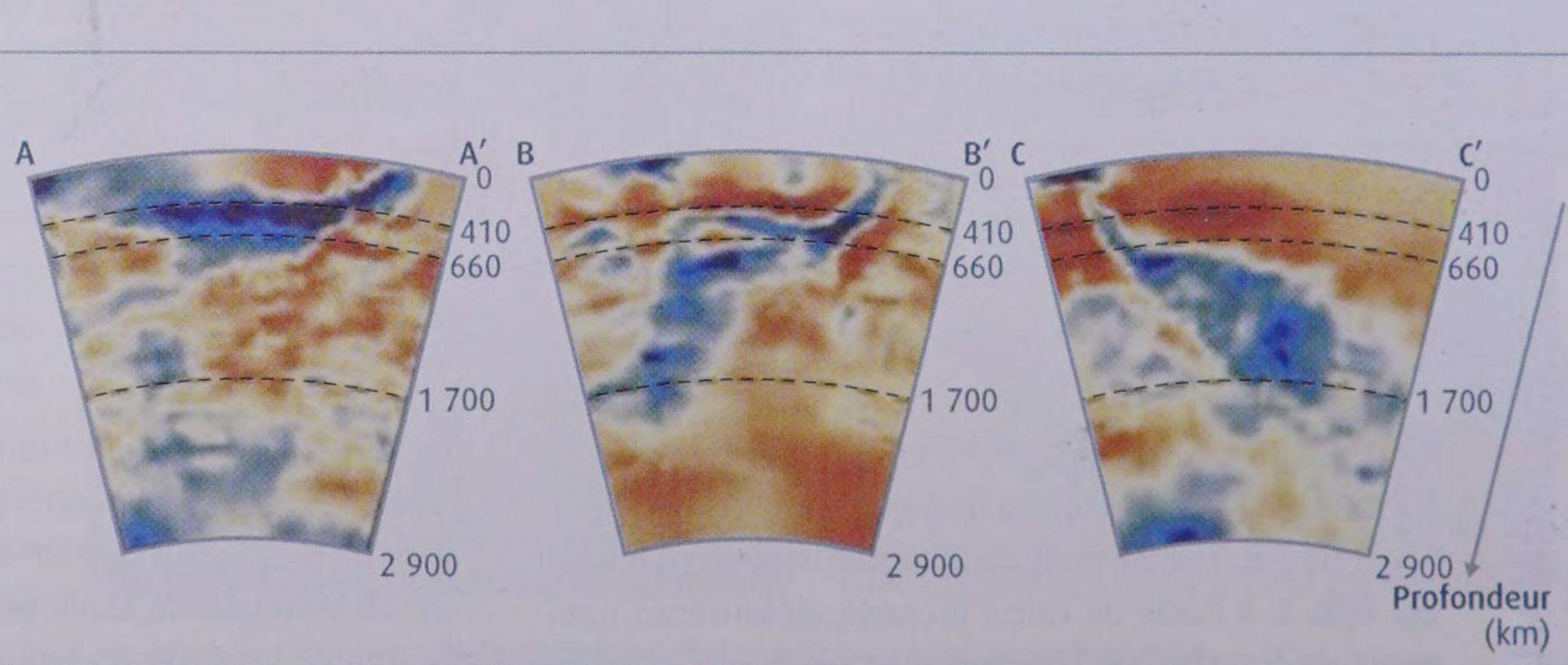
Tomographie sismique à 200 km de profondeur sous l'océan Pacifique.

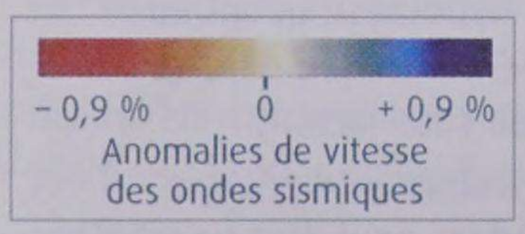


Tomographie sismique entre 80 et 600 km de profondeur sous le trajet A-B. La zone d'anomalie négative à l'aplomb des îles Samoa se prolonge jusqu'à 2 900 km de profondeur dans le manteau.

1 Étude du manteau sous l'océan Pacifique par tomographie sismique.

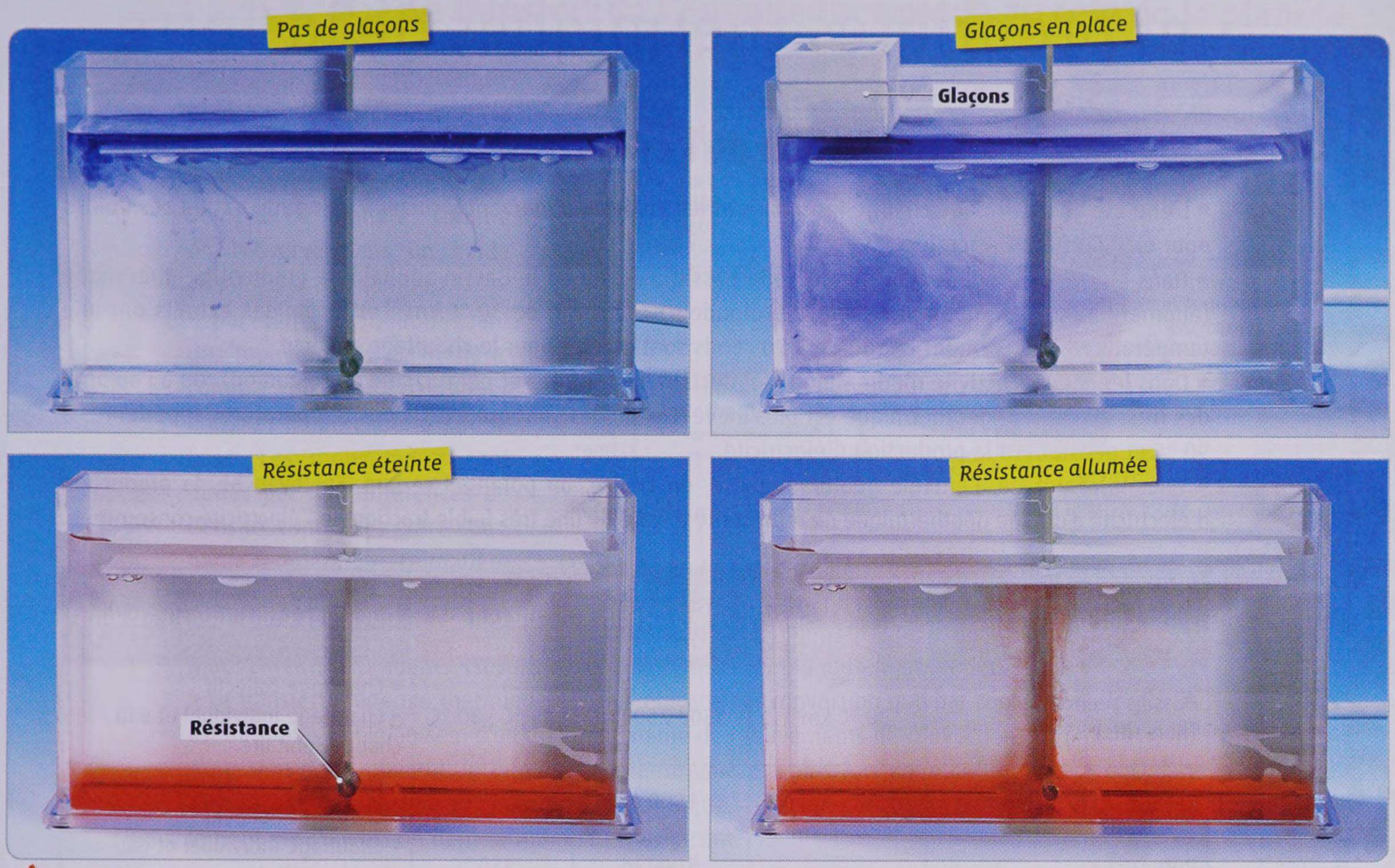






2 Étude des marges de l'océan Pacifique par tomographie sismique. Trois tomographies ont été réalisées entre 0 et 2900 km de profondeur à la verticale des trajets A-A′, B-B′ et C-C′.

Interpréter la convection mantellique



3 Une modélisation analogique. Dans un aquarium rempli d'eau, on a déposé au fond une couche d'eau colorée en rouge et, en surface, une couche d'eau colorée en bleu. Cette dernière peut être refroidie localement par des glaçons. Une résistance permet de chauffer localement la base de la couche rouge.

La lithosphère océanique froide et dense plonge dans l'asthénosphère au niveau des zones de subduction, souvent presque jusqu'à la base du manteau. Ce mouvement de convection descendant tire sur toute la lithosphère océanique et il est en grande partie responsable du mouvement de divergence des plaques de part et d'autre de la dorsale. Cette divergence entraîne la remontée passive de matériau mantellique solide, chaud et peu profond (moins de 300 km) sous la dorsale, dont la fusion partielle produit du magma. Le moteur de la divergence au niveau des dorsales associées à des plaques qui ne sont pas en subduction n'est pas encore bien élucidé. D'autres remontées de matériau mantellique chaud, solide et en général peu profond sont observées à l'aplomb de certains rifts continentaux. Elles sont à l'origine d'une activité magmatique. Les principaux mouvements de convection ascendants dans le manteau sont liés aux panaches de matériau mantellique solide, chaud et d'origine profonde (limite noyau-manteau pour la plupart). Un magmatisme de point chaud est observé à l'aplomb de ces panaches, tant en milieu océanique que continental.

4 Les mouvements de convection dans le manteau terrestre.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Proposez une explication aux zones d'anomalie négative des vitesses sismiques sur le doc. 1, et aux zones d'anomalie positive des vitesses sismiques sur doc. 2.

2 **DOC. 1 À 4.** Réalisez un schéma du globe terrestre en coupe sur lequel vous représenterez les mouvements de convection mantellique et les contextes géodynamiques associés.

3 **EN CONCLUSION.** Sachant qu'une machine thermique transforme de l'énergie thermique en énergie mécanique (mouvement), justifiez que l'on qualifie la Terre de machine thermique.

UNITÉS BILAN DES

CHAPITRE 1

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

UNITÉ 1 L'exploitation de l'énergie géothermique en France

• L'énergie géothermique chauffe les roches et les fluides qui peuvent y circuler. L'Homme extrait ces fluides pour exploiter cette énergie.

• Dans les bassins sédimentaires comme le Bassin parisien ou le Bassin aquitain, le gradient géothermique (augmentation de température avec la profondeur) est voisin de 30 °C.km^{-1} et les fluides extraits ont une température généralement inférieure à 90 °C. Ils sont utilisés pour le chauffage collectif.

• Dans les zones à activité magmatique (subduction aux Antilles et point chaud à la Réunion), ou à l'aplomb des rifts, le gradient géothermique est plus élevé. Les fluides sont prélevés à des températures supérieures à 90 °C et permettent la production d'électricité.

• Pour le chauffage, l'énergie géothermique a, en France, un potentiel certain. En revanche, la production d'électricité d'origine géothermique ne représente encore qu'une très faible fraction de l'électricité consommée.

Contextes géologiques	Gradient géothermique	Profondeur d'extraction du fluide	Température du fluide prélevé	Quelques utilisations possibles
Bassins sédimentaires (hors rifts)	30 °C.km^{-1}	1500-2500 m	45 °C - 80 °C	• Chauffage collectif • Chauffage individuel et eau chaude sanitaire
Zones de subduction Points chauds	> 30 °C.km^{-1}	1 000 m	250 °C	• Électricité • Chauffage collectif • Chauffage individuel et eau chaude sanitaire
Rifts		5 000 m	> 150 °C	

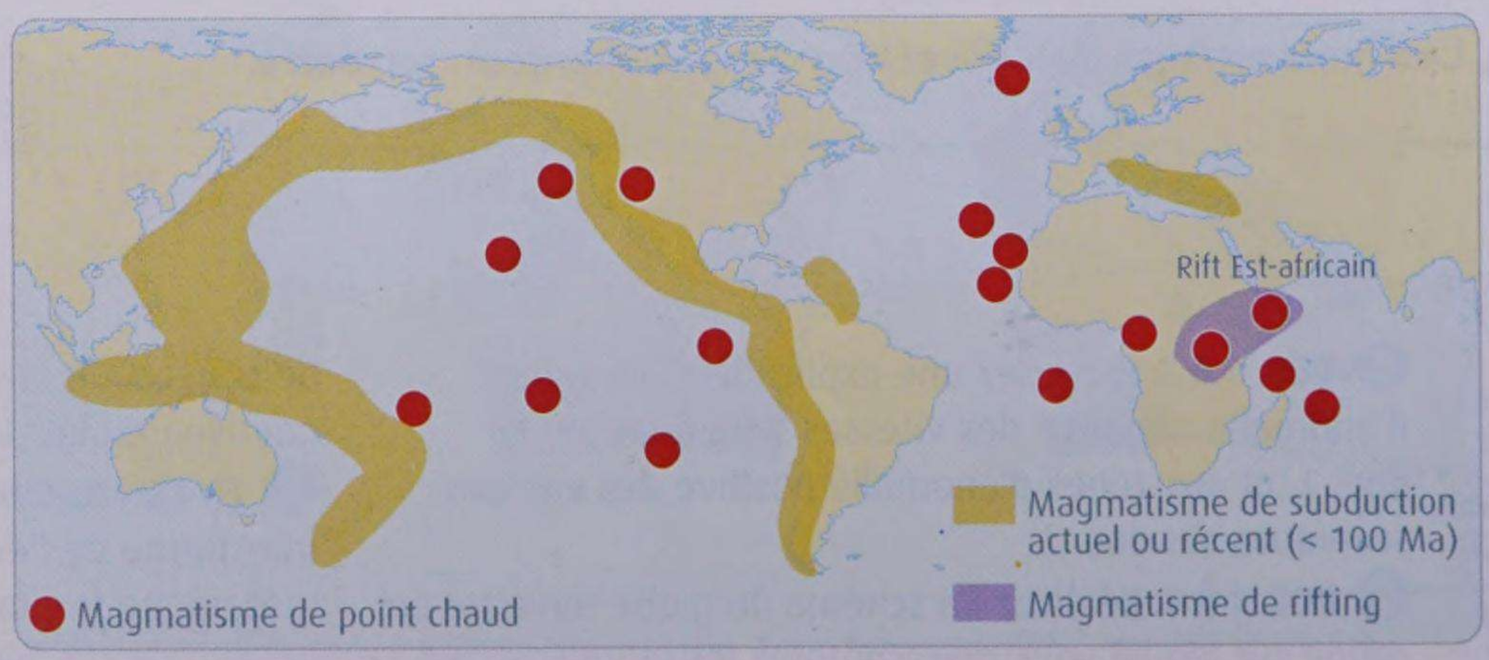
Les exploitations géothermiques françaises en relation avec leur contexte géologique.

UNITÉ 2 Origine et utilisation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale

• L'énergie géothermique provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches. Le manteau en est le principal producteur.

• Le flux géothermique (quantité d'énergie géothermique émise par unité de surface et de temps) résulte du transfert de l'énergie géothermique depuis les profondeurs vers la surface de la Terre. Au niveau des dorsales, le flux est fort (production de lithosphère). Au niveau des subductions, on observe une zone de flux faible (liée au plongement de plaque lithosphérique froide) et une zone de flux fort (associée à l'arc volcanique). Les principaux contextes géologiques propices à la production d'électricité géothermique sont les zones à fort flux géothermique (et à fort gradient géothermique) associées au magmatisme de subduction, au magmatisme de point chaud et au magmatisme de rifting. Certaines de ces zones ne sont pas encore exploitées pour la production d'électricité géothermique.

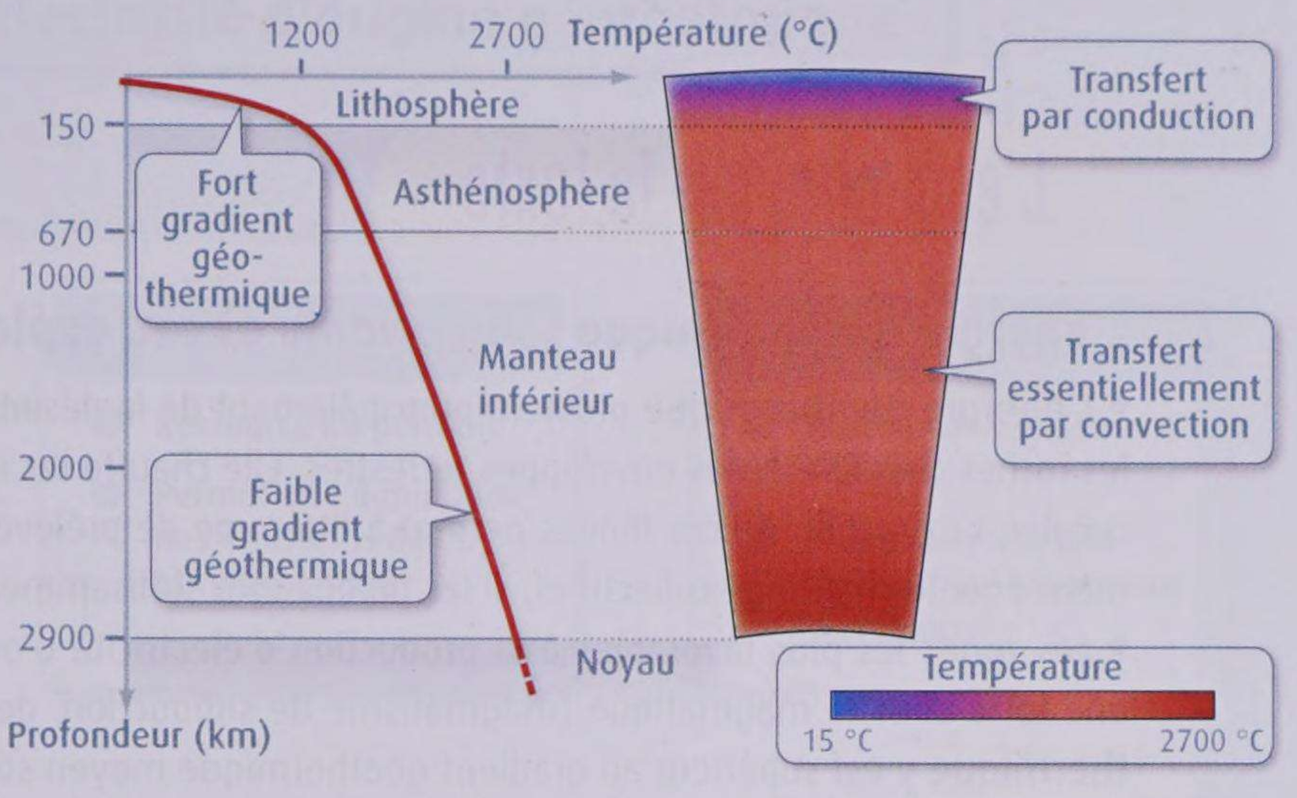
• Le prélèvement de l'énergie géothermique par l'Homme ne représente qu'une infime partie de l'énergie géothermique totale dissipée.



Principales zones propices à la production d'électricité géothermique.

UNITÉ 3 Le transfert de l'énergie thermique au sein de la planète

• L'énergie géothermique peut être transférée vers la surface selon deux modes :
– par conduction, sans mouvement de matière, comme on l'observe dans un fluide chauffé par son sommet.
– par convection, impliquant des mouvements de matière, comme on peut l'observer dans un fluide chauffé par sa base. Les mouvements sont initiés par des différences de densité, contrôlées entre autre par la température. La matière chaude, moins dense que la matière froide, est animée de mouvements ascendants. En surface, elle se refroidit et plonge en profondeur.

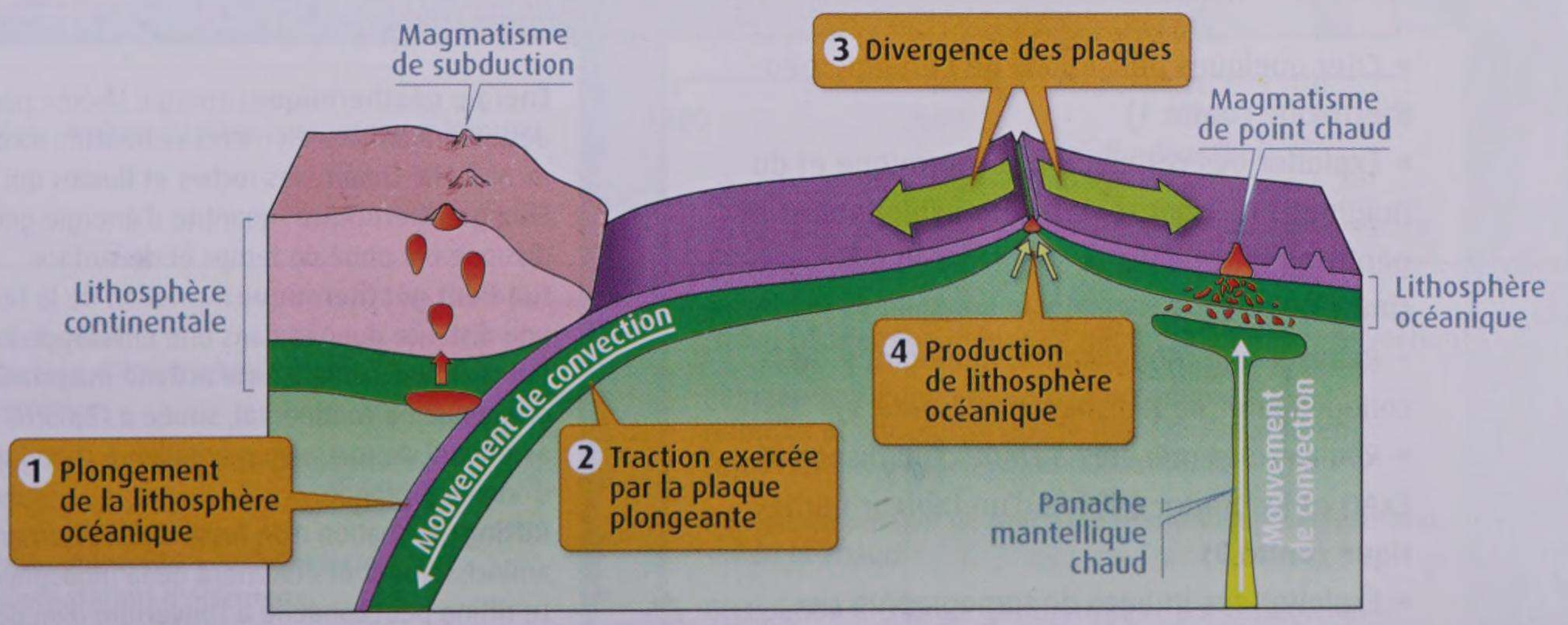


Modalités de transfert de l'énergie thermique au sein du globe (le noyau n'est pas représenté).

• Le transfert d'énergie thermique est plus efficace par convection que par conduction : le gradient thermique est ainsi plus faible au sein d'un matériau animé de mouvements de convection.
• Au sein de la planète, le gradient géothermique est plus fort dans la lithosphère que dans le manteau sous-jacent. Le transfert de l'énergie géothermique s'effectue par conduction dans la lithosphère et essentiellement par convection dans le manteau sous-jacent.

UNITÉ 4 La Terre, machine thermique

• La tomographie sismique permet d'observer des mouvements ascendants de matière chaude et solide de grande ampleur au sein du manteau. Ces panaches mantelliques initiés en profondeur sont associés au magmatisme de point chaud. Ils sont à l'origine d'une dissipation d'énergie thermique par convection.
• La tomographie sismique permet aussi d'observer le plongement de la lithosphère océanique (devenue plus dense par son refroidissement) dans manteau sous-jacent. Ce plongement, qui correspond à un mouvement de convection descendante, exerce une traction sur le reste de la plaque, contribuant, au niveau de la dorsale, à la divergence des plaques et à la remontée passive de matériau mantellique chaud, solide et peu profond. La fusion partielle de ce manteau produit du magma, dont le refroidissement crée une nouvelle lithosphère.
• La Terre est ainsi une machine thermique : la dissipation de l'énergie géothermique est associée à des mouvements du manteau et des plaques lithosphériques, à l'origine de l'activité sismique et magmatique du globe.



Quelques manifestations et conséquences de la convection au sein du manteau.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 1

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

L'essentiel par le texte

L'énergie géothermique : son origine et son exploitation par l'Homme

• L'**énergie géothermique** provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches des différentes enveloppes terrestres. Elle chauffe les roches en profondeur et les fluides qui peuvent y circuler. L'extraction de ces fluides permet à l'Homme de prélever l'énergie géothermique et de l'utiliser notamment pour le chauffage collectif et, si les fluides sont suffisamment chauds, pour la production d'électricité.

• Les zones les plus favorables à la production d'électricité d'origine géothermique sont celles qui présentent une forte activité magmatique (magmatisme de subduction, de **point chaud** et de **rifting**). Le **gradient géothermique** y est supérieur au gradient géothermique moyen sous les continents.

• Le prélèvement de cette énergie ne représente qu'une infime partie de ce qui est dissipé en surface. Son exploitation, associée à d'autres énergies renouvelables, constitue une des alternatives aux énergies fossiles.

Le transfert en surface de l'énergie géothermique

• Le transfert de l'énergie géothermique depuis les profondeurs de la Terre vers les enveloppes superficielles est à l'origine d'un **flux géothermique** qui est émis en surface. L'énergie géothermique est transférée par conduction dans la lithosphère (propagation de proche en proche, sans mouvement de matière) et essentiellement par convection (impliquant des mouvements de matière à l'état solide) dans le manteau sous-jacent.

• La convection au sein du manteau se manifeste par l'ascension de roches mantelliques chaudes et à l'état solide, et par le plongement de plaques de lithosphère océanique froide dans le manteau sous-jacent. L'énergie géothermique est ainsi transformée en énergie mécanique (mouvements de matière) : la Terre est donc une machine thermique.

• Le flux géothermique en surface reflète la dynamique du globe : le flux fort observé à l'aplomb des dorsales est associé à la production de lithosphère océanique ; les zones de subduction présentent à la fois un flux faible associé au plongement de la lithosphère océanique âgée et refroidie, et un flux fort associé à l'arc volcanique résultant du magmatisme de subduction.

Les capacités et attitudes

- Citer quelques utilisations de l'énergie géothermique **(unité 1)**
- Exploiter des cartes du flux thermique et du magmatisme pour replacer les exploitations géothermiques dans le cadre structural **(unités 1 et 2)**
- Réaliser une modélisation analogique de la conduction et de la convection **(unité 3)**
- Réaliser des mesures à l'aide d'un dispositif ExAO et les traiter à l'aide d'un tableur numérique **(unité 3)**
- Exploiter des images de tomographie sismique et une modélisation analogique **(unité 4)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Énergie géothermique : énergie libérée par la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches. Elle chauffe les roches et fluides qui y circulent.
Flux géothermique : quantité d'énergie géothermique dissipée par unité de temps et de surface.
Gradient géothermique : variation de la température sur une distance donnée dans une enveloppe terrestre.
Point chaud : zone à forte activité magmatique en milieu océanique ou continental, située à l'aplomb d'un panache ascendant de matériau mantellique chaud et solide d'origine profonde.
Rifting : formation d'un fossé d'effondrement, ou rift, par amincissement et étirement de la lithosphère continentale. Le rifting peut conduire à l'ouverture d'un océan. Il est associé à une activité magmatique.

L'essentiel par l'image

La production d'électricité d'origine géothermique

Trois contextes favorables

- Zones de subduction
- Points chauds
- Rifts continentaux

- Flux et gradient géothermiques forts
- Activité magmatique

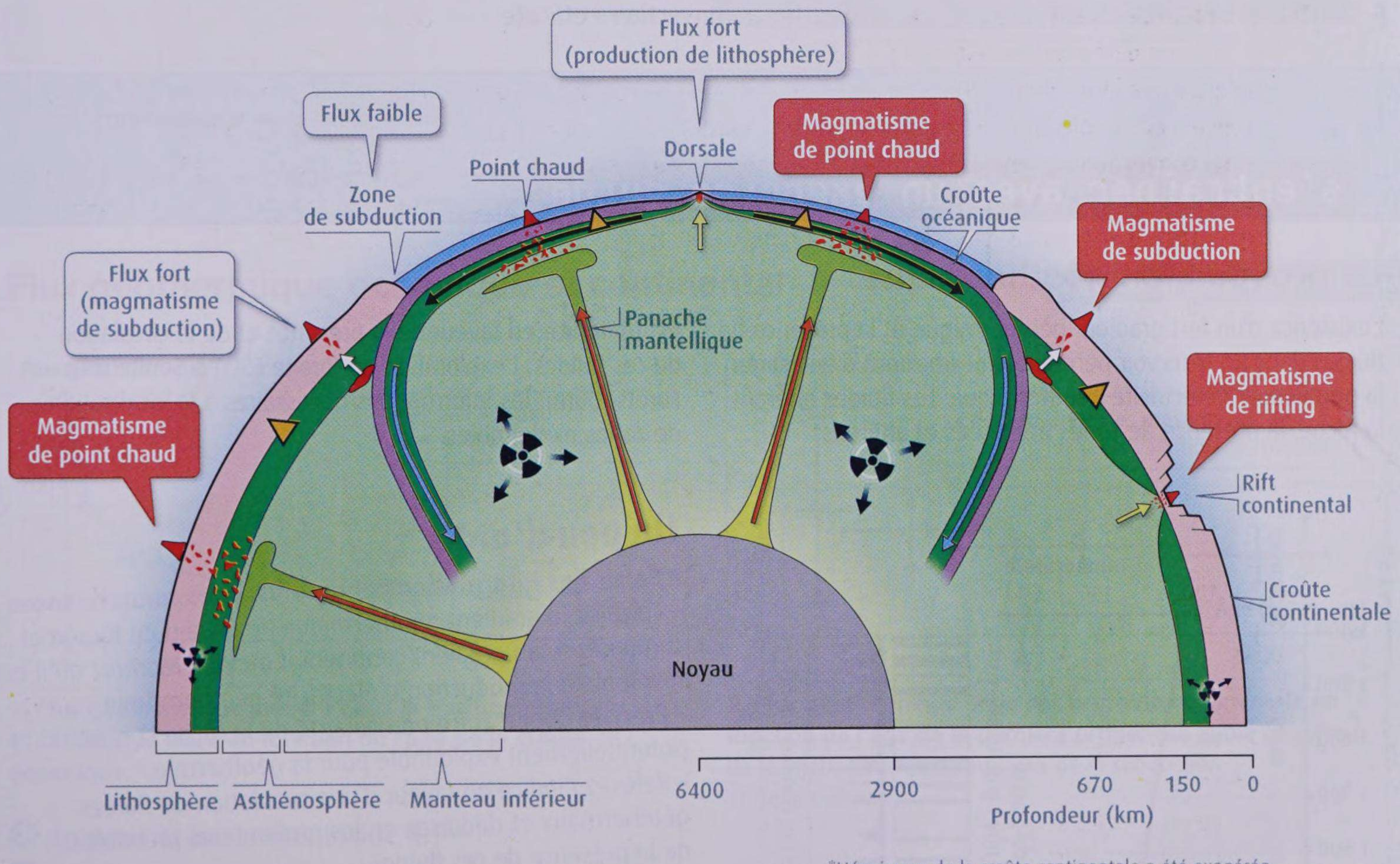
Avantages

- Ressource inépuisable
- Permet une diminution des émissions de CO_2 atmosphérique

Limites

- Ressource inégalement répartie
- Production très loin de satisfaire les besoins mondiaux

La Terre, machine thermique



*L'épaisseur de la croûte continentale a été exagérée

- Contexte favorable à la production d'électricité d'origine géothermique
- Divergence des plaques de lithosphère océanique
- Production d'énergie géothermique par désintégration d'éléments radioactifs
- Ascension de matériau mantellique profond, solide et chaud (dissipation d'énergie géothermique par convection)
- Plongement d'une lithosphère océanique âgée, refroidie et plus dense que le manteau sous-jacent (mouvement de convection descendant)
- Remontée passive de matériau mantellique peu profond, solide et chaud
- Dissipation d'énergie géothermique par conduction

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Le flux géothermique :

a. provient majoritairement de l'énergie solaire.

b. provient majoritairement de la désintégration d'éléments radioactifs des roches.

c. est fort au niveau des zones de subduction du fait du plongement de la lithosphère océanique.

d. est fort au niveau des dorsales du fait de la production de lithosphère océanique.

2. L'énergie géothermique est dissipée :

a. uniquement par conduction.

b. uniquement par convection.

c. principalement par convection.

3. Le gradient géothermique sous les continents :

a. est en moyenne de 100 °C.km^{-1}.

b. est en moyenne de 30 °C.km^{-1}.

c. est en moyenne de 3 °C.km^{-1}.

2 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Les zones de subduction sont peu favorables à l'exploitation géothermique car le flux géothermique y est faible.

b. Les dorsales, caractérisées par un fort flux géothermique, sont des zones à fort potentiel d'exploitation géothermique.

c. La conduction est un mode de propagation de l'énergie thermique, de proche en proche, sans mouvement macroscopique de matière.

3 Une phrase appropriée

Rédigez une phrase scientifiquement correcte, avec les termes suivants :

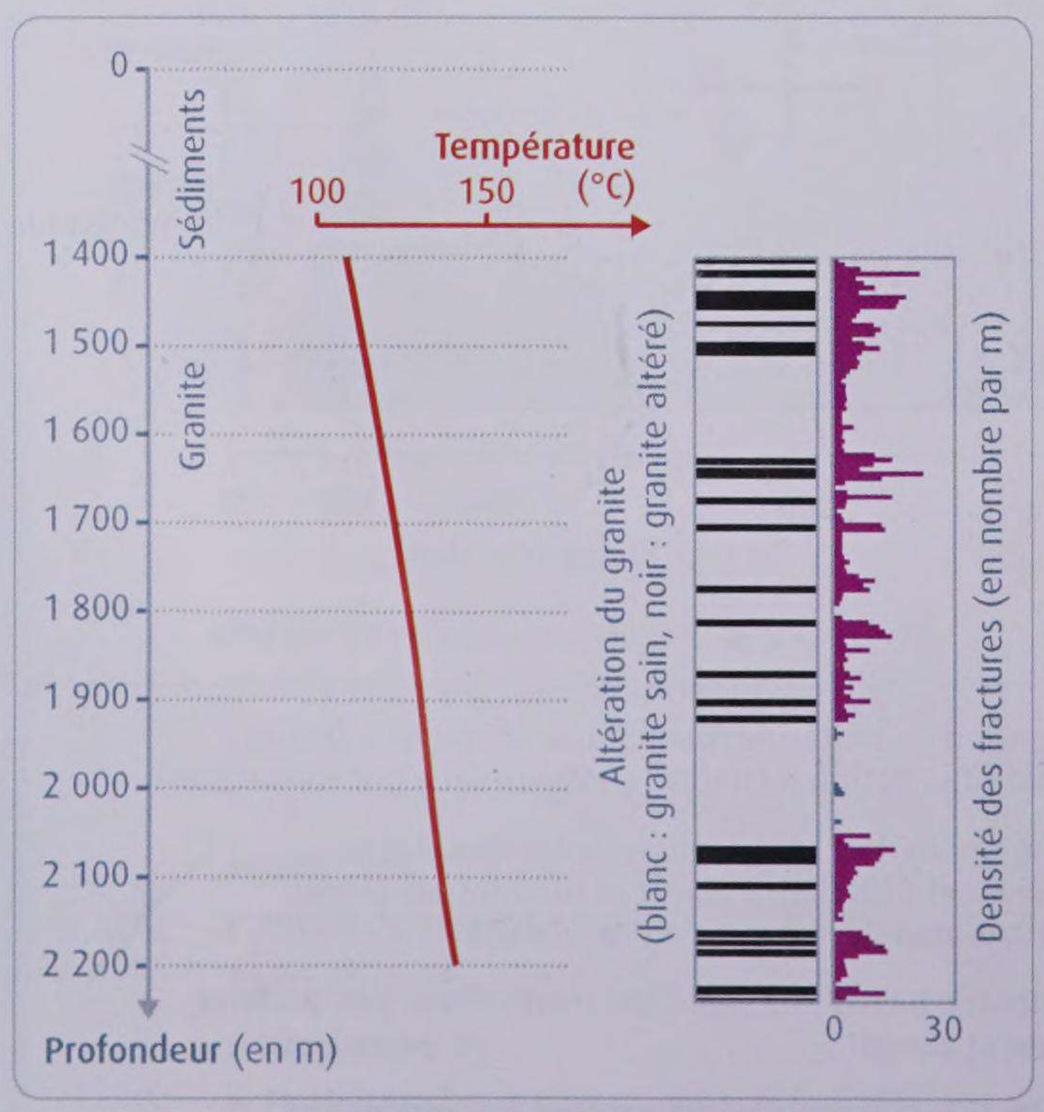
a. Gradient géothermique – subduction – magmatisme.

b. Énergie géothermique – mode de transfert – conduction – convection – efficace.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 La prospection géothermique

L'existence d'un fort gradient géothermique et la présence de fluides dans un réservoir perméable permettent d'envisager la production d'électricité géothermique. Les fluides altérant la roche, la présence de zones fracturées et altérées est un indice en faveur de la présence et de la circulation de ces fluides. L'exploration du forage ESP1 à Soultz-sous-Forêts fournit les informations nécessaires à la localisation de zones exploitables.



1. Température, fracturation et altération des roches dans le forage ESP1 de Soultz-sous-Forêts.

Un peu d'aide

• Saisir des informations et mobiliser ses connaissances

– Calculez le gradient géothermique au niveau du forage et comparez-le au gradient continental moyen. Montrez qu'il est favorable à la production d'électricité géothermique.

– Précisez quelle autre particularité de la roche la rend potentiellement exploitable pour la géothermie.

– Relevez l'indice en faveur d'une circulation de fluides géothermaux et déduisez-en les profondeurs probables de la présence de ces fluides.

• Conclure

Organisez votre argumentation pour montrer que la zone étudiée est propice à la production d'électricité géothermique.

QUESTION Montrez que la zone d'étude présente des caractéristiques géologiques favorables à la production d'électricité géothermique et indiquez la profondeur des zones d'extraction des fluides géothermaux, en justifiant votre réponse.

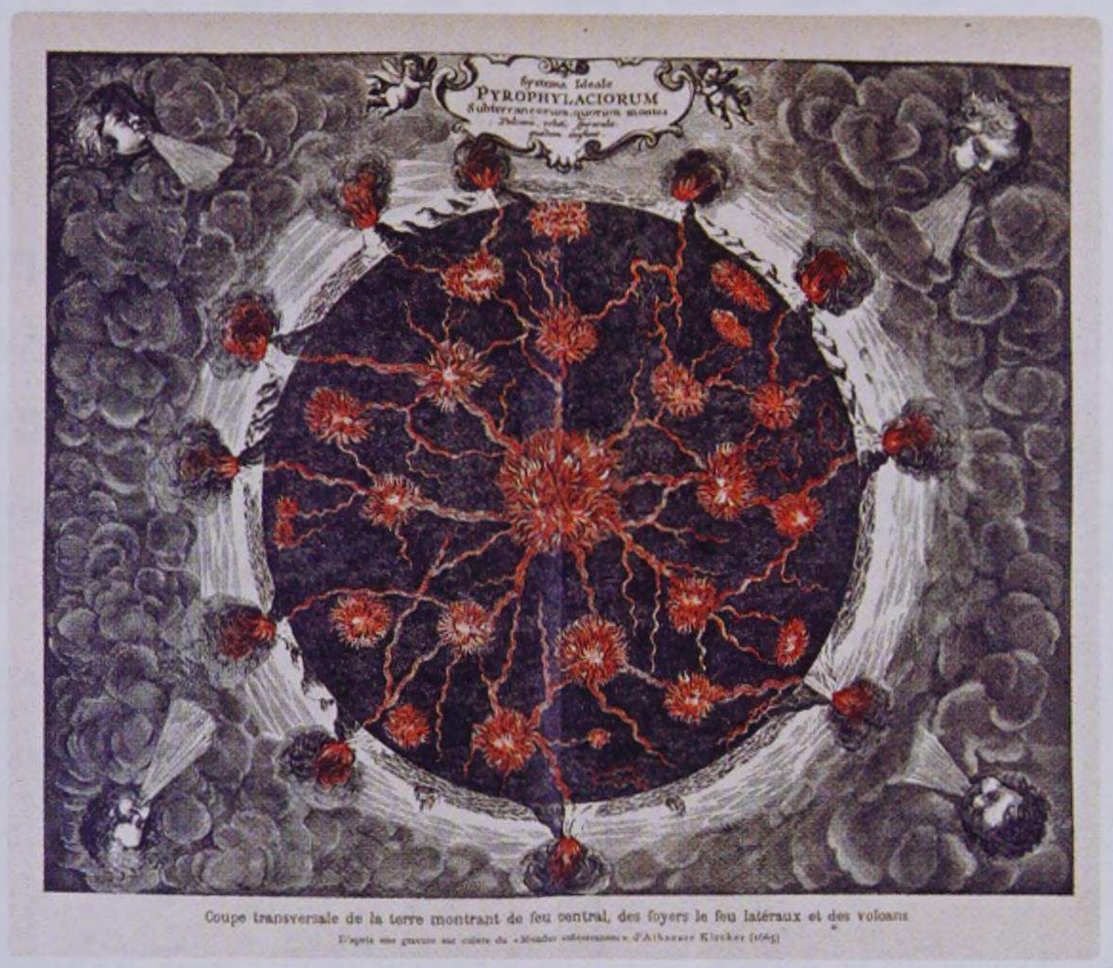
5 La Terre selon Athanasius Kircher

Commenter et critiquer un texte historique

Athanasius Kircher (1602-1680), père jésuite allemand, propose au XVIIe siècle une représentation de la Terre qui, selon lui, est un ancien soleil refroidi. Dans son écrit *Mundus Subterraneus*, il cherche à expliquer l'origine du volcanisme.

« Cette figure représente les nids de la chaleur ou de feu, ou, ce qui est la même chose, les réserves de feu réparties [...] dans l'ensemble des entrailles terrestres. Depuis le centre donc, nous avons conduit le feu, par tous les chemins du monde souterrain, jusqu'aux volcans eux-mêmes qui se trouvent à la surface. [...] Les canaux qui conduisent le feu sont de minuscules fissures de la Terre, par lesquelles se répandent les souffles ignés. »

Extrait de *Mundus Subterraneus*, A. Kircher, 1665



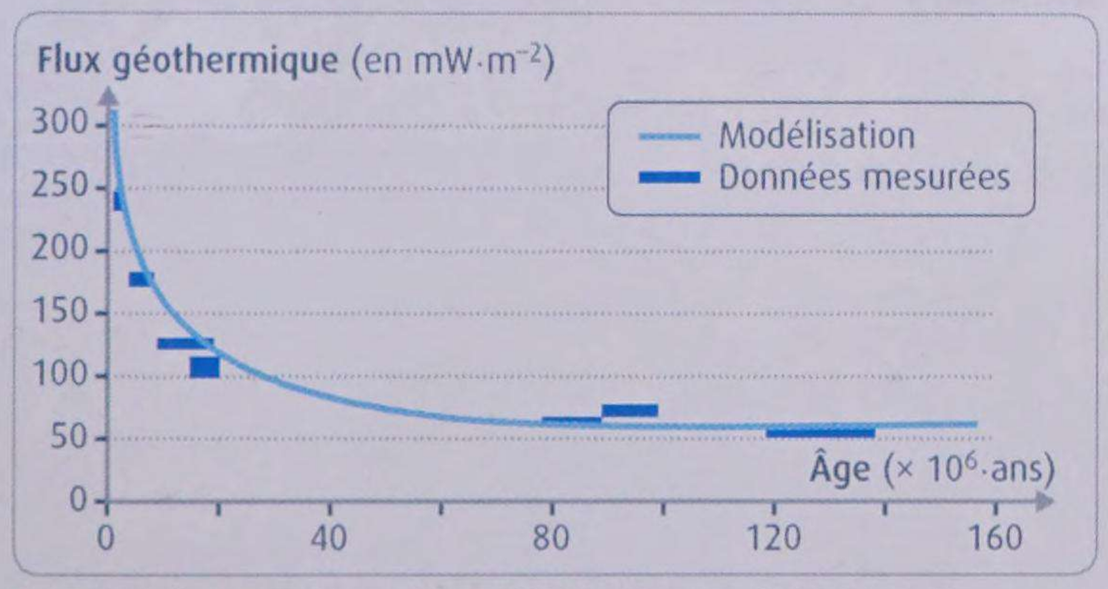
Coupe transversale de la terre montrant de feu central, des foyers le feu latéraux et des volcans

1. Une représentation de la Terre en 1665.

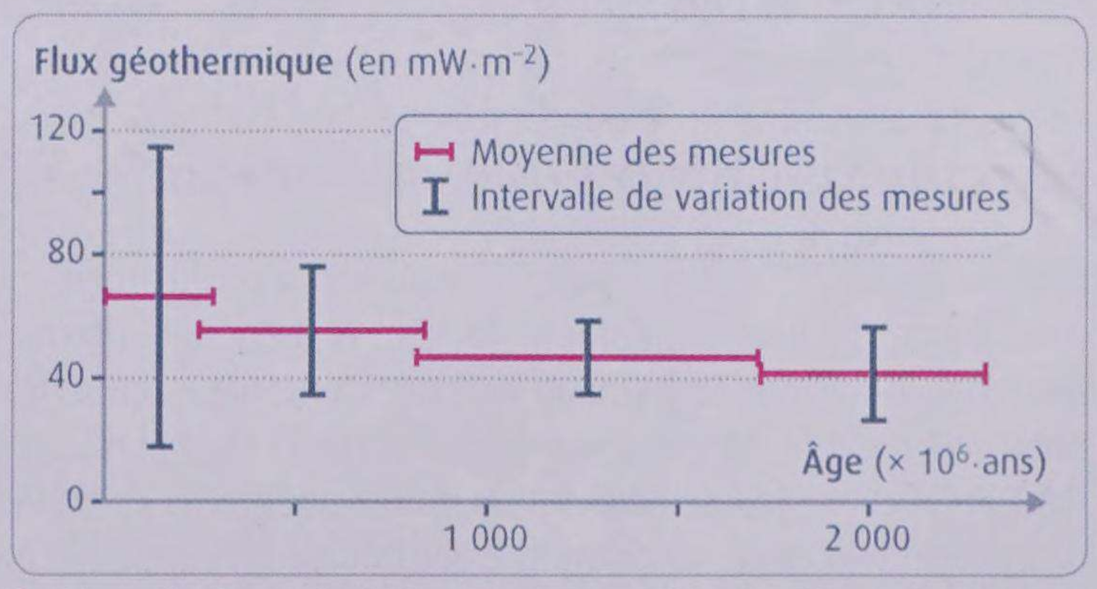
- Commentez, en le critiquant si nécessaire, le texte d'Athanasius Kircher.

6 Flux géothermique océanique et continental

Exploiter un graphique et raisonner



1. Flux géothermique mesuré dans le Pacifique Nord et l'Atlantique Nord en fonction de l'âge de la croûte océanique.



2. Flux géothermique émis par la croûte continentale en fonction de l'âge de la dernière orogenèse subie (processus de formation de reliefs au cours de la subduction et de la collision).

1. Analysez et interprétez le doc. 1.
2. Analysez et interprétez le doc. 2.
3. Actuellement, c'est dans la croûte continentale des chaînes de montagnes érigées dans un contexte de subduction que l'on retrouve de fortes variations de flux géothermique. Expliquez pourquoi.

7 L'origine et la dissipation de l'énergie géothermique

Rédiger une synthèse des connaissances

- Après avoir précisé la source principale de l'énergie géothermique, présentez ses modes de dissipation et ses conséquences sur le mouvement des enveloppes terrestres.

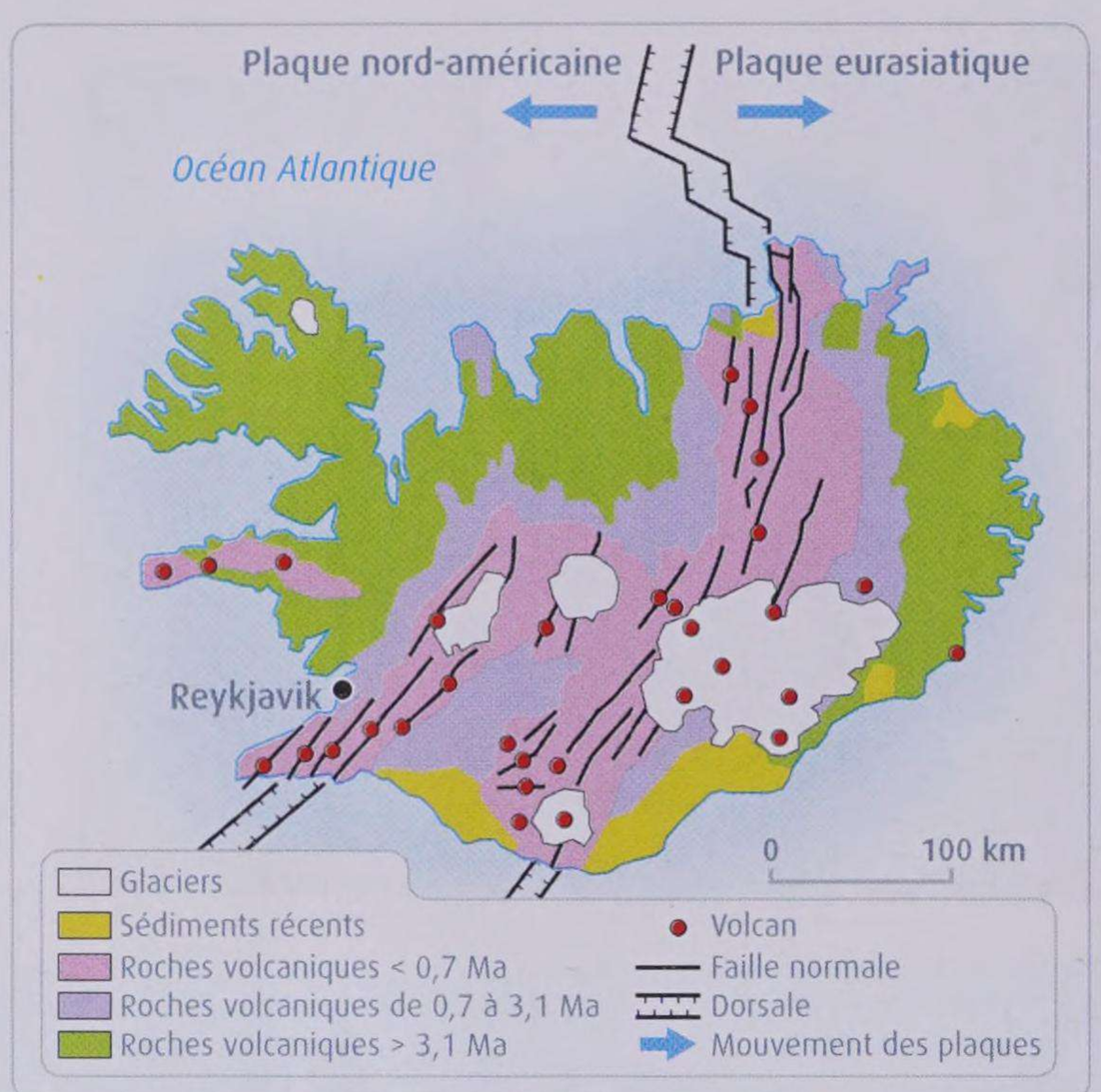
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

8 Le potentiel d'exploitation géothermique en Islande

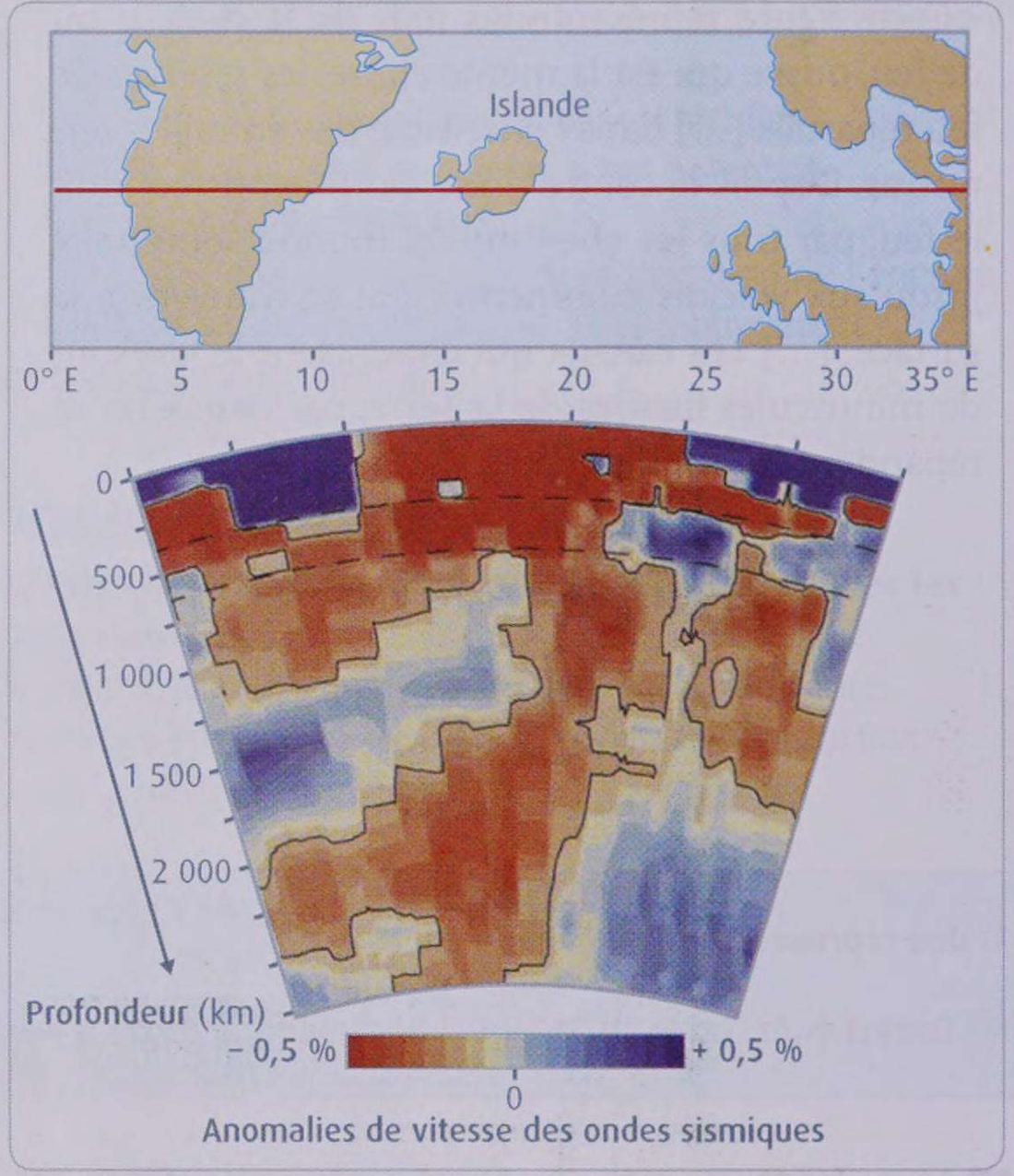
Mettre en relation des informations

En Islande, sixième pays producteur d'électricité géothermique, plus de 90 % des habitations sont chauffées par géothermie.



1. Carte géologique simplifiée de l'Islande.

En exploitant les documents présentés, proposez une explication au fort potentiel d'exploitation géothermique en Islande.



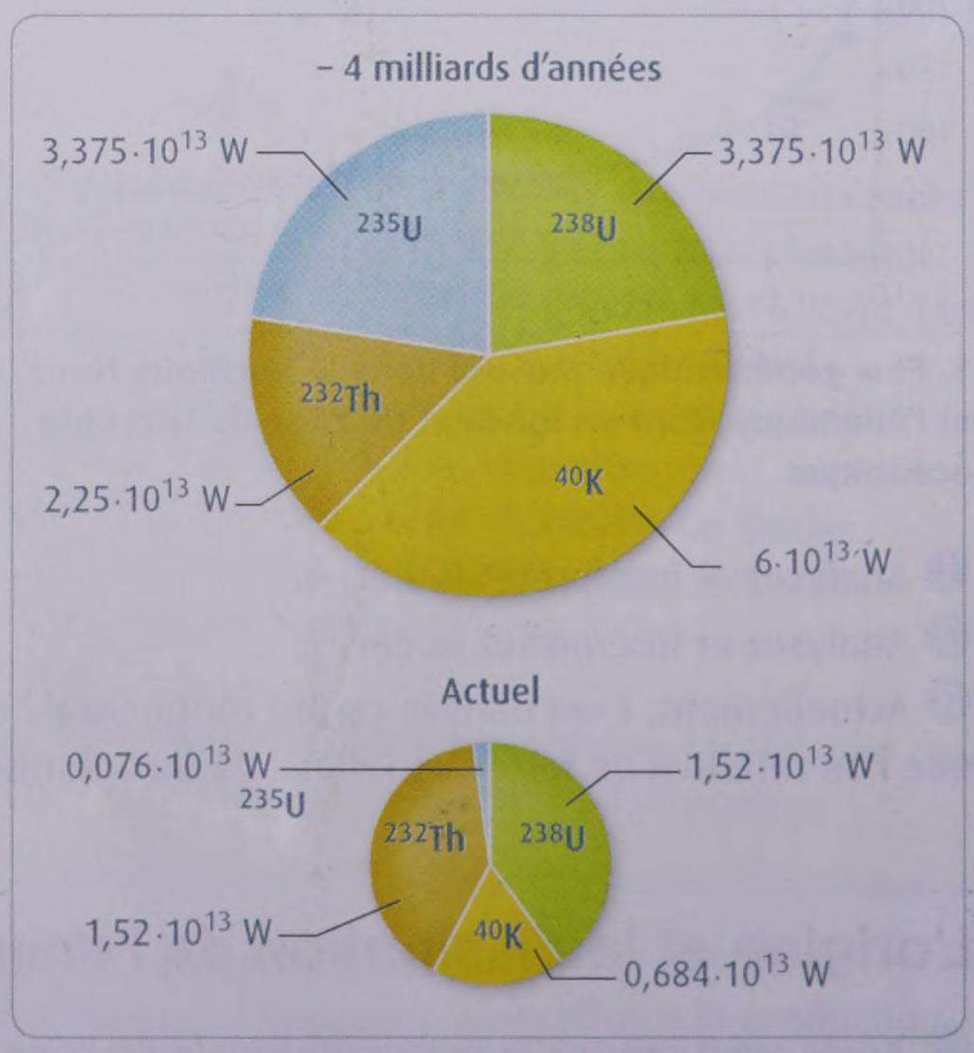
2. Étude du manteau sous l'Islande par tomographie sismique.

9 Énergie géothermique et énergie solaire

Saisir des informations et raisonner

La Terre reçoit 7.10^{17} W d'énergie en provenance du Soleil. À cette énergie externe, s'ajoute 42.10^{12} W d'énergie interne en provenance des profondeurs de la Terre. L'énergie interne provient notamment de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches, de la cristallisation du noyau interne et de la dissipation de l'énergie thermique accumulée lors de la formation de la Terre.

1. Montrez par le calcul que la désintégration des éléments radioactifs est la source principale de l'énergie interne actuelle.
2. Proposez une estimation de la quantité d'énergie géothermique produite il y a 4 milliards d'années. Comparez avec la production actuelle.
3. En justifiant votre réponse, critiquez la phrase de G. Buffon (1707-1788) tirée de *Les Époques de la Nature*, rédigé en 1778 : « La chaleur que le soleil envoie à la Terre est assez petite en comparaison de la chaleur propre du globe terrestre ; et cette chaleur envoyée par le Soleil ne seroit pas seule suffisante pour maintenir la nature vivante ».



1. Quantité d'énergie produite par les éléments radioactifs des enveloppes terrestres aujourd'hui et il y a 4 milliards d'années.

CHAPITRE 2

La plante domestiquée

Pour se nourrir, s'habiller, ou encore se soigner, l'Homme met à profit la biodiversité végétale. Il a d'abord utilisé des plantes sauvages, puis, il y a environ 10 000 ans, il a commencé à domestiquer les plantes afin de pouvoir les cultiver.

Pommier.

Comment une plante sauvage peut-elle être domestiquée par l'Homme ?

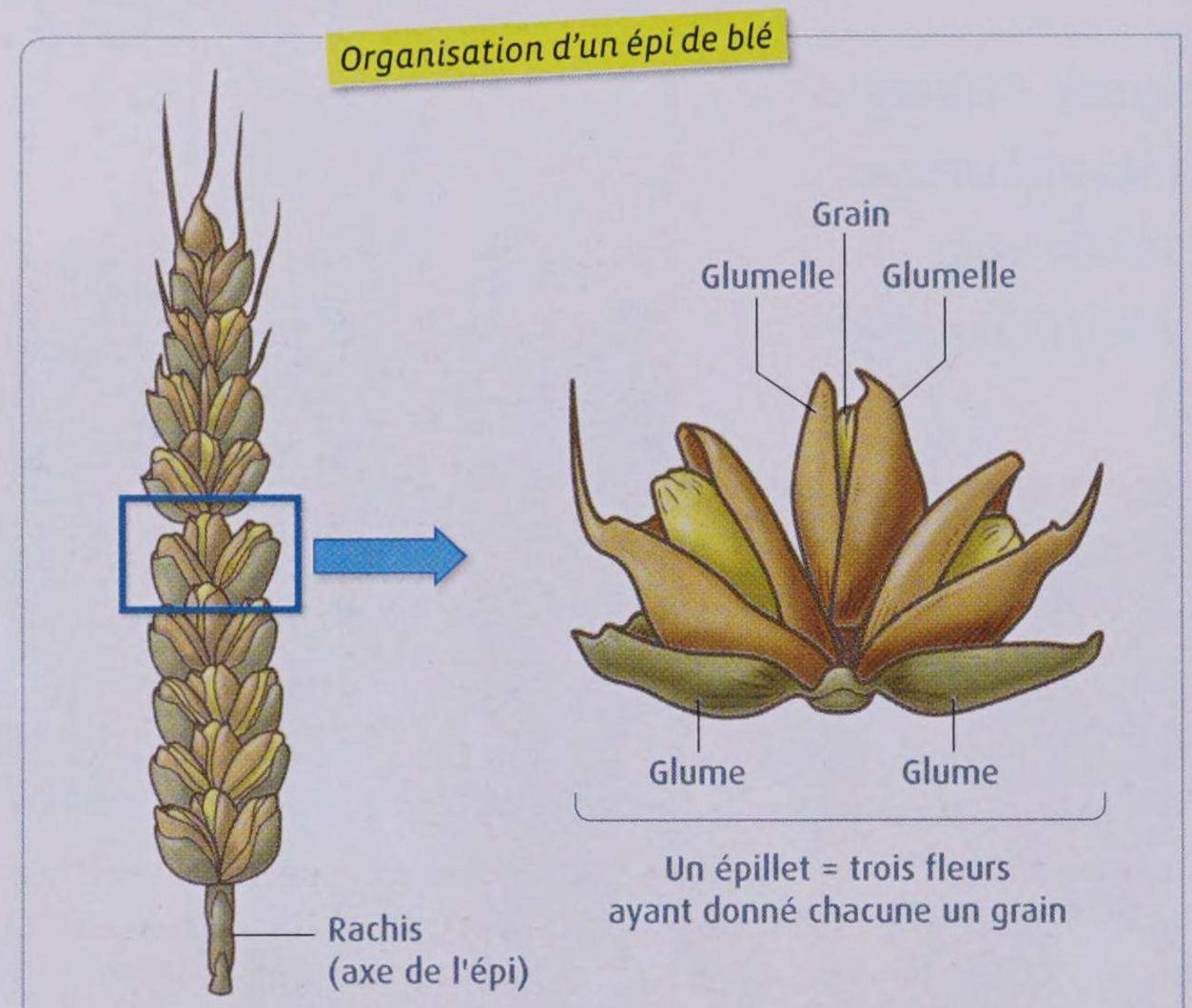
UNITÉ 1

L'origine des espèces cultivées

On trouve souvent, parmi les plantes sauvages, des espèces qui ressemblent aux espèces de plantes cultivées. En revanche, on ne rencontre jamais les espèces cultivées dans les écosystèmes naturels.

Comment expliquer l'origine des espèces cultivées ?

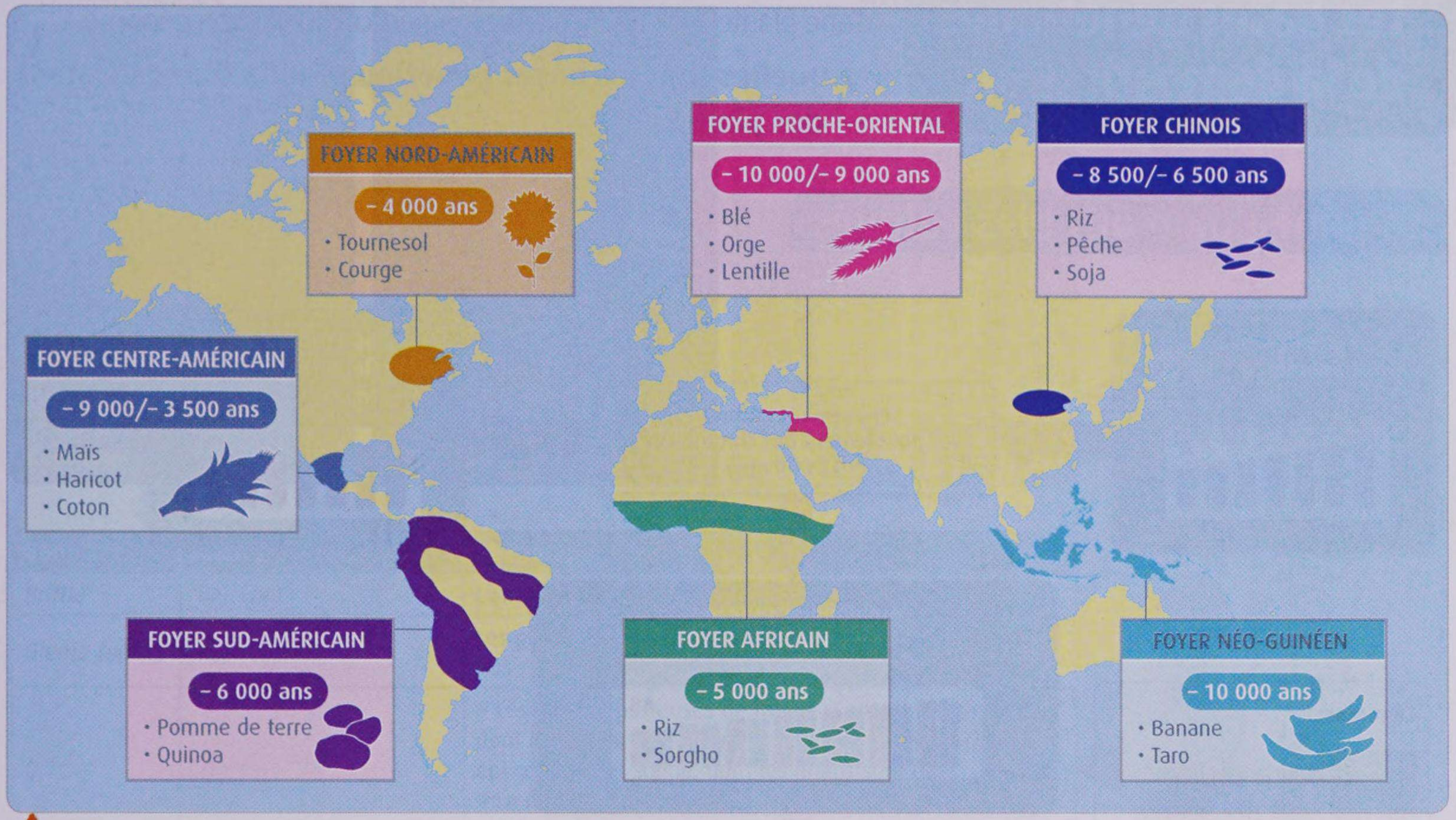
L'origine des blés cultivés



1 Comparaison des blés cultivés et d'espèces sauvages proches. Les blés cultivés (blé dur et blé tendre) présentent des caractéristiques communes avec les espèces sauvages que sont l'amidonnier sauvage et l'engrain sauvage : leurs fleurs sont regroupées par trois et rassemblées dans des épis ; chaque fleur ne donne qu'un seul grain ; le grain est entouré par des glumelles qui tombent soit spontanément (grain nu), soit lors du battage des épis (grain vêtu).

2 Répartition géographique de l'engrain sauvage, de l'amidonnier sauvage et de cultures de blé parmi les plus anciennes connues. Grâce aux recherches archéologiques, on a localisé et daté les plus anciens blés cultivés. Par ailleurs, les espèces sauvages les plus proches du blé cultivé sont toujours présentes au Proche-Orient.

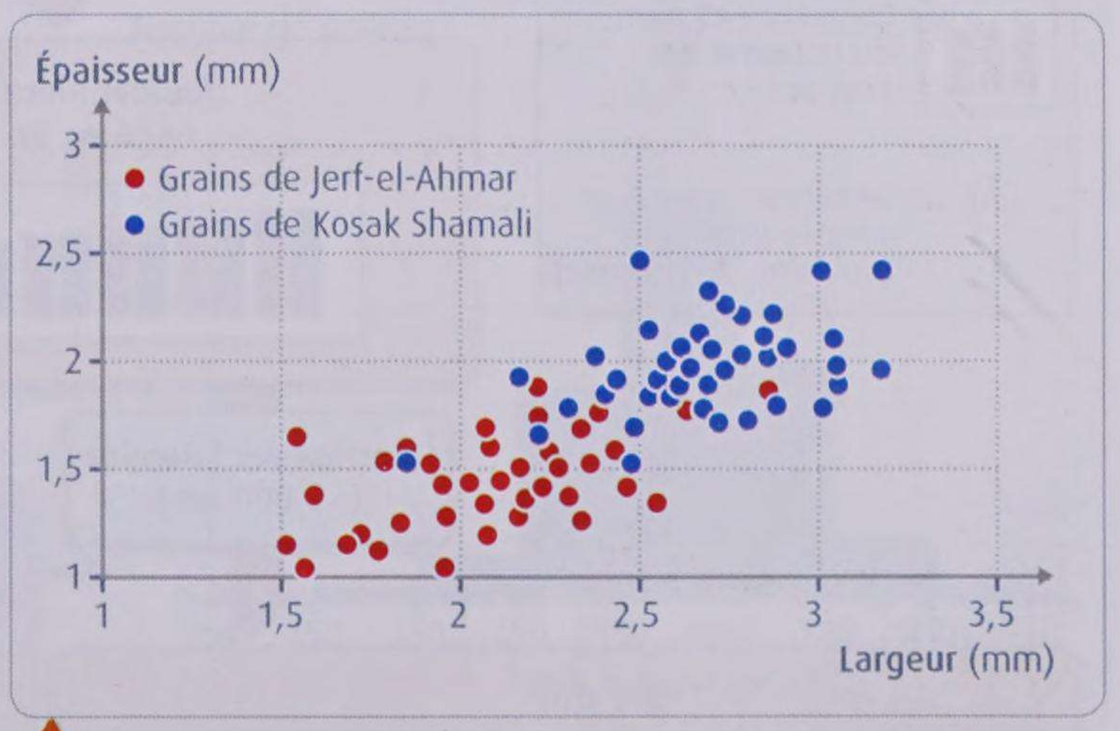
Le processus de domestication



3 Quelques foyers de domestication. Chaque espèce cultivée est issue de la modification par l'Homme d'espèces sauvages au cours d'un processus appelé domestication. Pour chaque espèce cultivée, le foyer de domestication est une région où l'on a découvert les plus anciennes formes cultivées de cette espèce et où l'on trouve actuellement des espèces sauvages proches de cette dernière.

Caractère	Engrain et amidonnier (sauvages)	Blé dur et blé tendre (cultivés)
Solidité de l'épi	Rachis très fragile → dissémination des grains facilitée	Rachis solide → récolte facilitée
Forme des grains à maturité	Vêtus → les glumelles protègent le grain	Nus → séparation grains/ glumelles et formation de farine facilitée
Maturation des grains des différents individus	Étalée dans le temps → probabilité de rencontrer des conditions favorables pour la maturation augmentée	Synchrone → récolte facilitée

4 Le syndrome de domestication du blé. On qualifie de syndrome de domestication l'ensemble des caractères qui distinguent une espèce cultivée des espèces sauvages proches.



5 Les caractéristiques de grains de blé de deux sites archéologiques : Jerf-el-Ahmar (Syrie, – 11 000 ans, antérieur à la domestication) et Kosak Shamali (Syrie, – 7 000 ans, postérieur à la domestication).

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 3.** Identifiez les arguments suggérant l'origine sauvage des espèces cultivées.
2. **DOC. 4.** Recherchez, pour la forme sauvage et la forme cultivée, l'avantage de chacun des caractères pour la plante d'une part et pour l'Homme d'autre part. Déduisez-en pourquoi on ne trouve aucune espèce cultivée en milieu naturel.
3. **DOC. 4 ET 5.** Mobilisez vos acquis concernant l'évolution pour formuler une hypothèse sur le processus qui a permis à l'Homme de réaliser la domestication.
4. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques et l'origine des espèces cultivées.

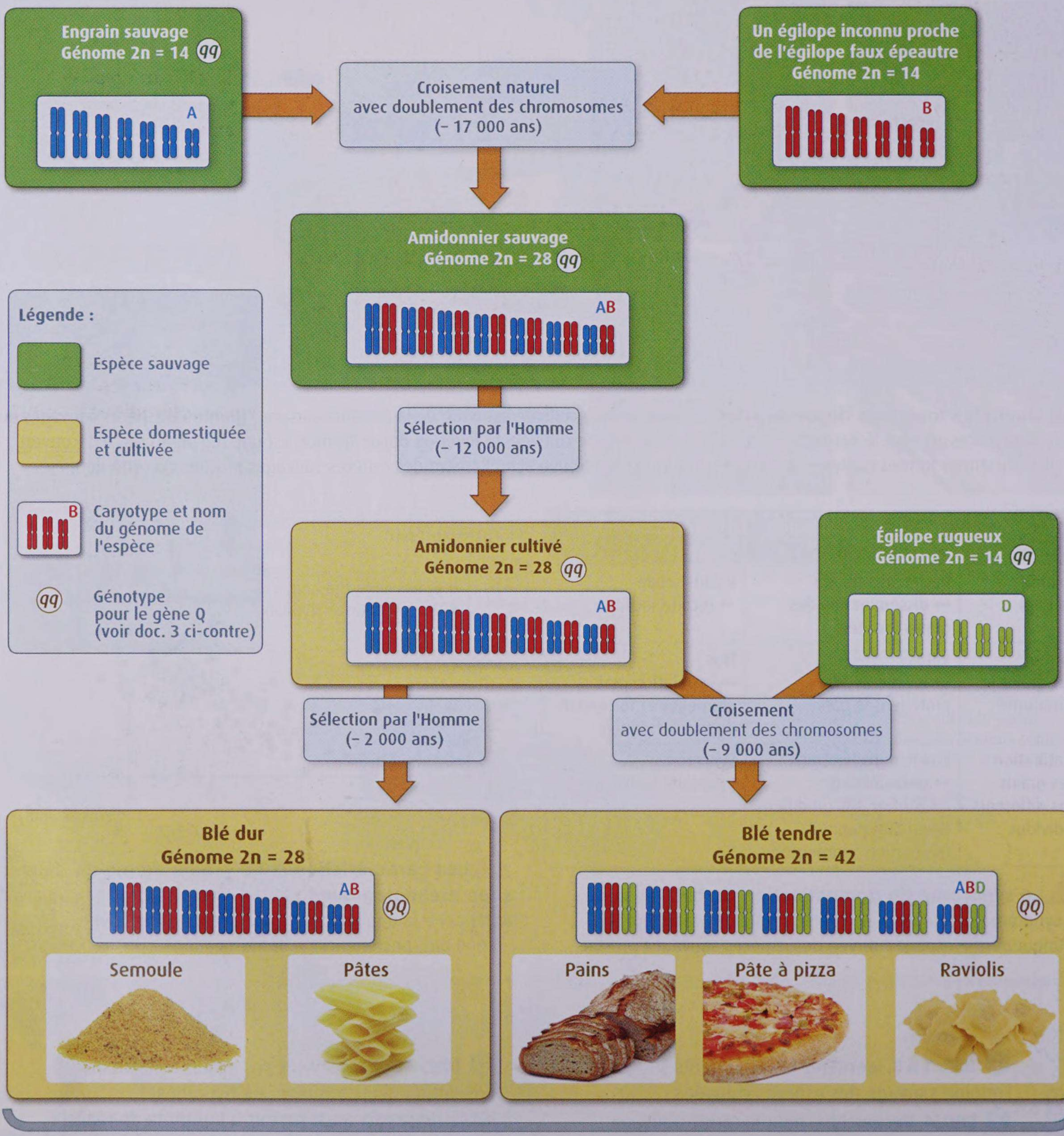
UNITÉ 2

Les bases génétiques de la domestication

La domestication est le résultat de la sélection par l'Homme d'individus d'espèces sauvages ayant des caractéristiques phénotypiques avantageuses pour lui. Les caractéristiques d'une plante sont déterminées, en particulier, par son génome.

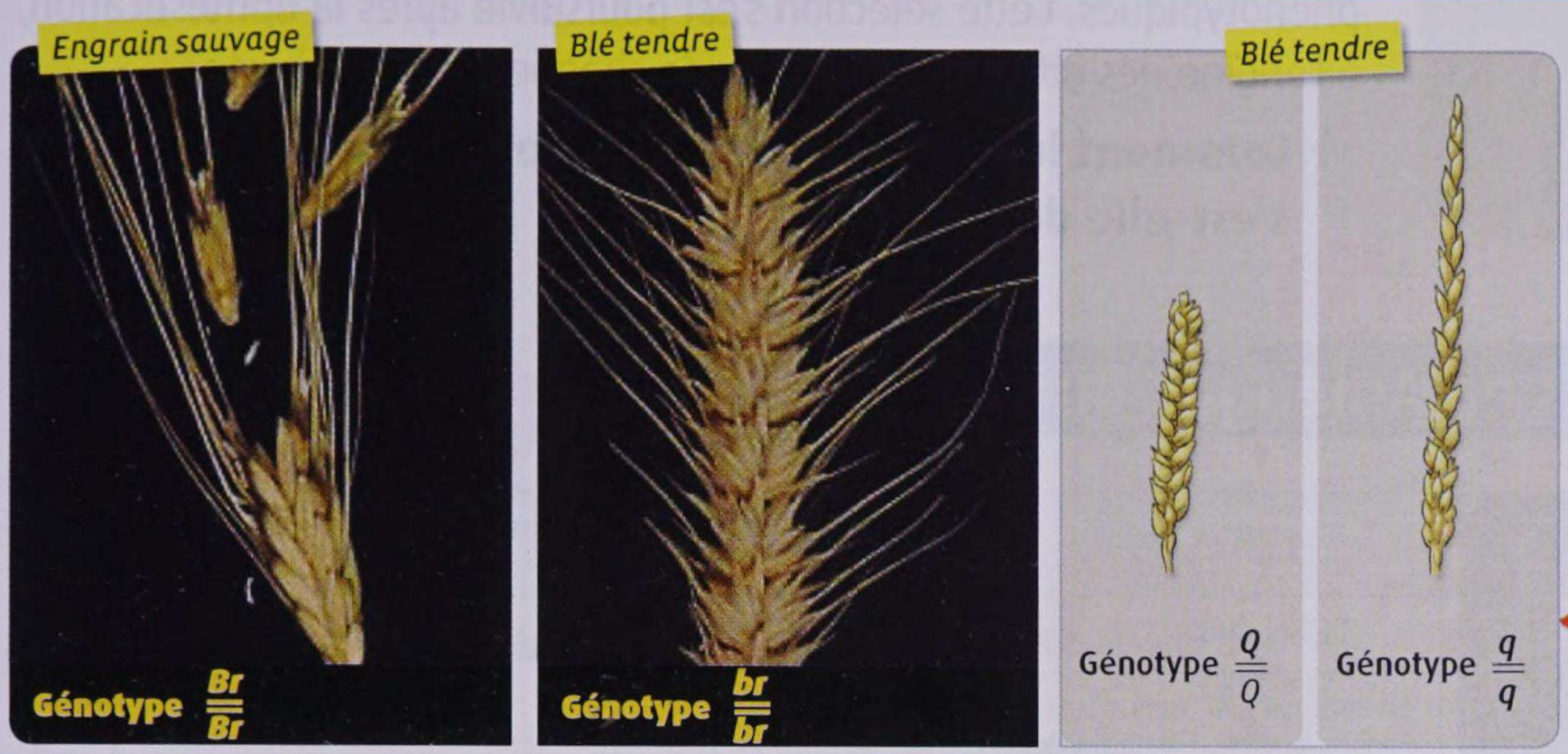
Quelles sont les bases génétiques de la domestication des plantes ?

La généalogie des blés cultivés



1 **Un scénario de l'origine des blés cultivés.**

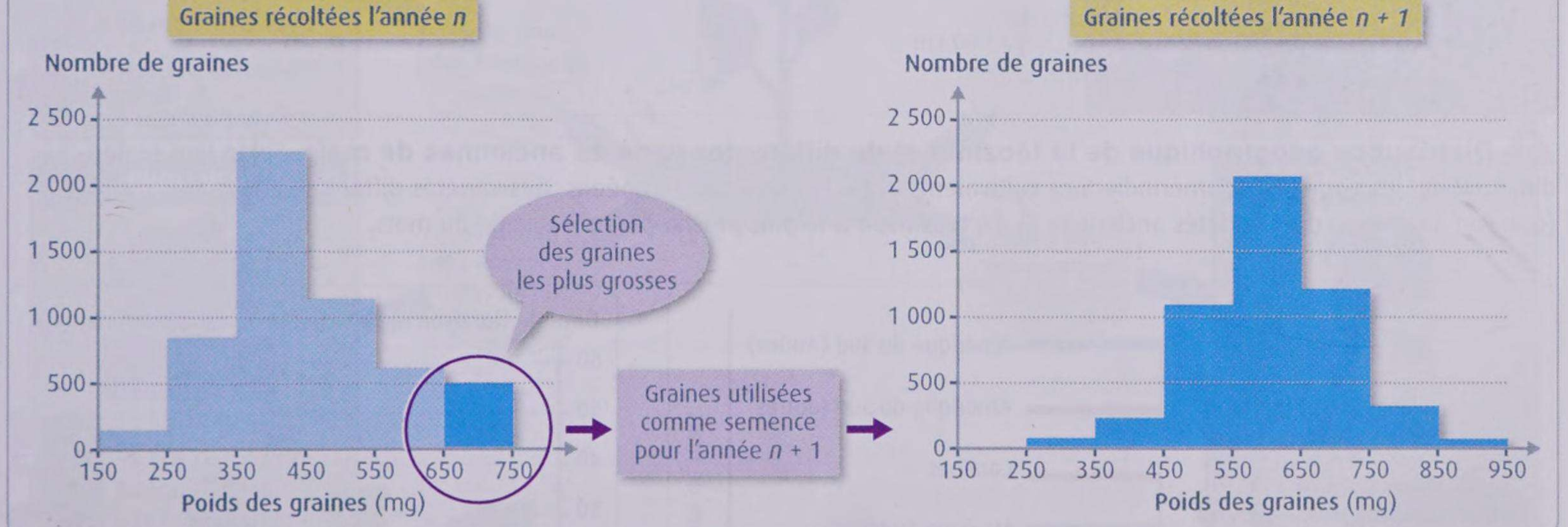
Des allèles impliqués dans la domestication des blés



2 Quelques épis de blé tendre et d'engrain sauvage.

Gène	Allèles	Phénotype
Brittle	(*Br*) (*br*)	L'allèle *br* donne un rachis (axe de l'épi) solide
Glume tenace	(*Tg*) (*tg*)	Les plantes porteuses de l'allèle *tg* produisent des grains nus
Q	(*Q*) (*q*)	• Les plantes porteuses de l'allèle *q* ont un épi cassant dont les grains sont vêtus. Celles qui ont l'allèle *Q* ont un épi compact et solide, dont les grains sont nus. • La mutation à l'origine de l'allèle *Q* est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution.

3 L'effet de quelques allèles sur les caractéristiques du blé.



4 Un exemple de sélection phénotypique chez le pois. Durant fort longtemps, les agriculteurs ont, volontairement ou non, sélectionné des caractères phénotypiques qui leur étaient utiles en pratiquant la sélection phénotypique. Cette méthode, utilisée jusqu'au XIXe siècle par tous les agriculteurs, a permis de faire évoluer empiriquement (sans connaissances en génétique) les espèces cultivées pour de nombreux caractères.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1.** Identifiez trois modifications génétiques spontanées survenues dans l'histoire des blés cultivés.
2. **DOC. 2, 3 ET DOC. 4 P. 243.** Montrez que les caractéristiques des blés cultivés peuvent être associées à un petit nombre de gènes.
3. **DOC. 4.** Indiquez quels types de caractères peuvent faire l'objet d'une sélection phénotypique.
4. **DOC. 3 ET 4.** Montrez comment certains caractères liés à la domestication ont pu être sélectionnés par l'Homme
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les bases génétiques de la domestication des plantes.

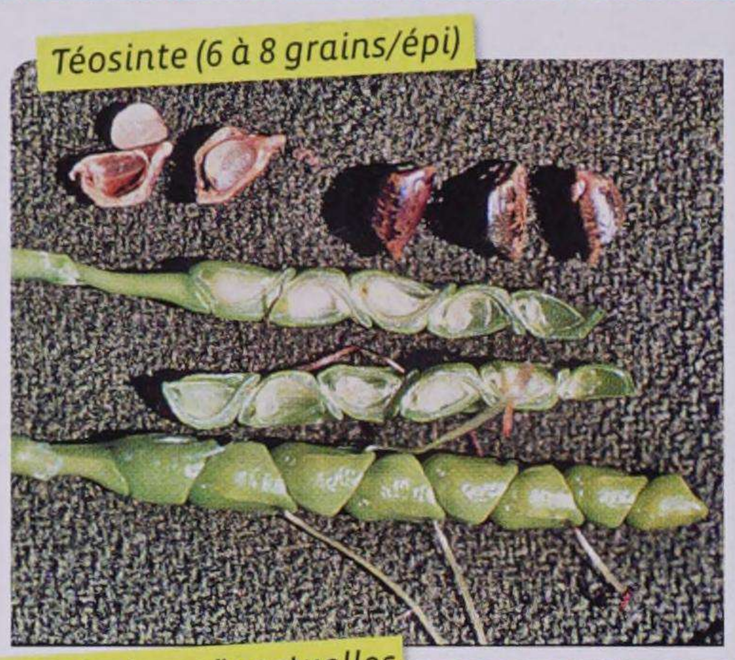
UNITÉ 3

La sélection variétale

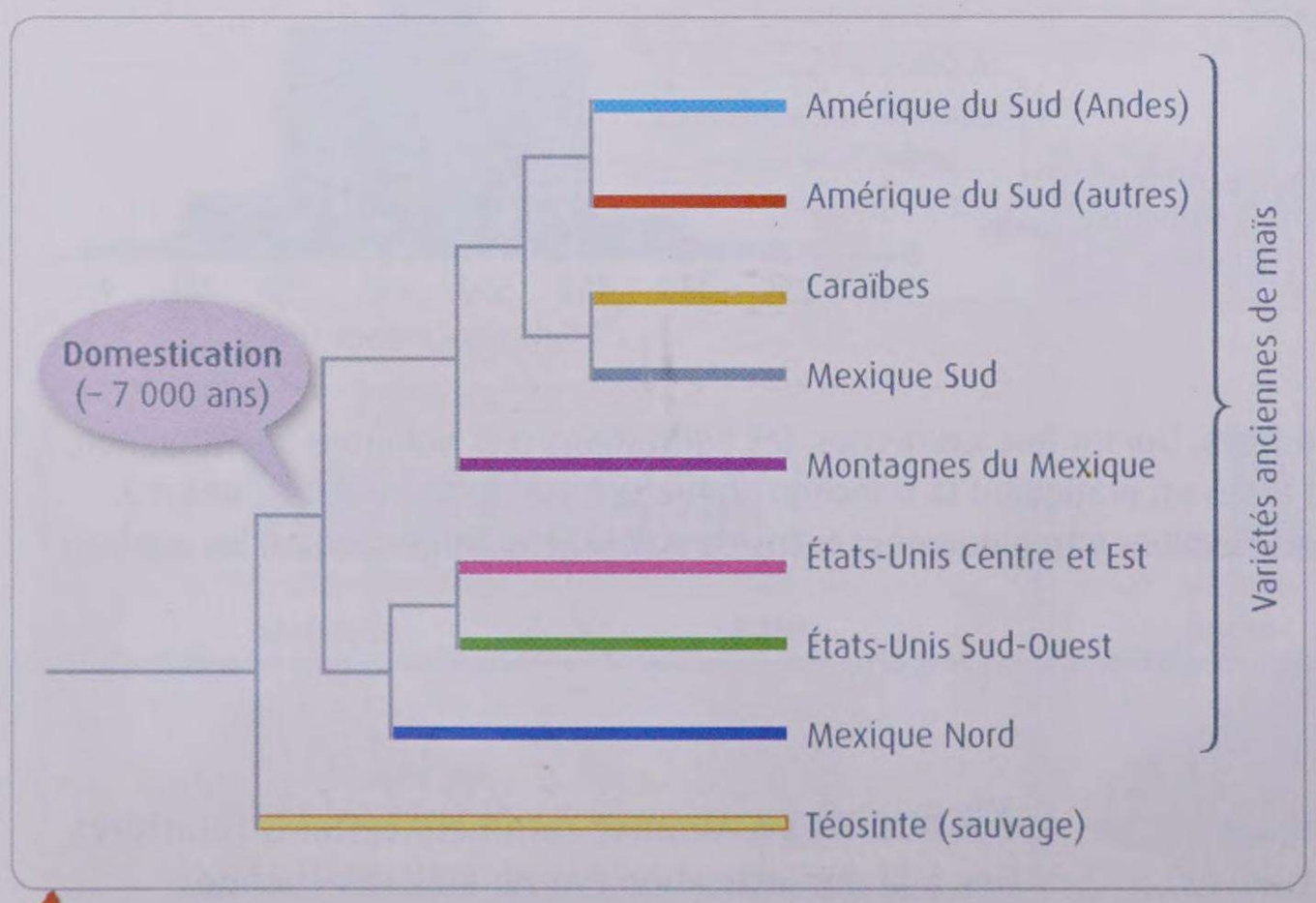
La domestication est le résultat de la sélection par l'Homme d'individus portant des allèles conférant certains caractères phénotypiques. Cette sélection s'est poursuivie après la domestication, à l'origine des différentes variétés de chaque espèce cultivée.

Comment la sélection des différentes variétés s'est-elle déroulée ?

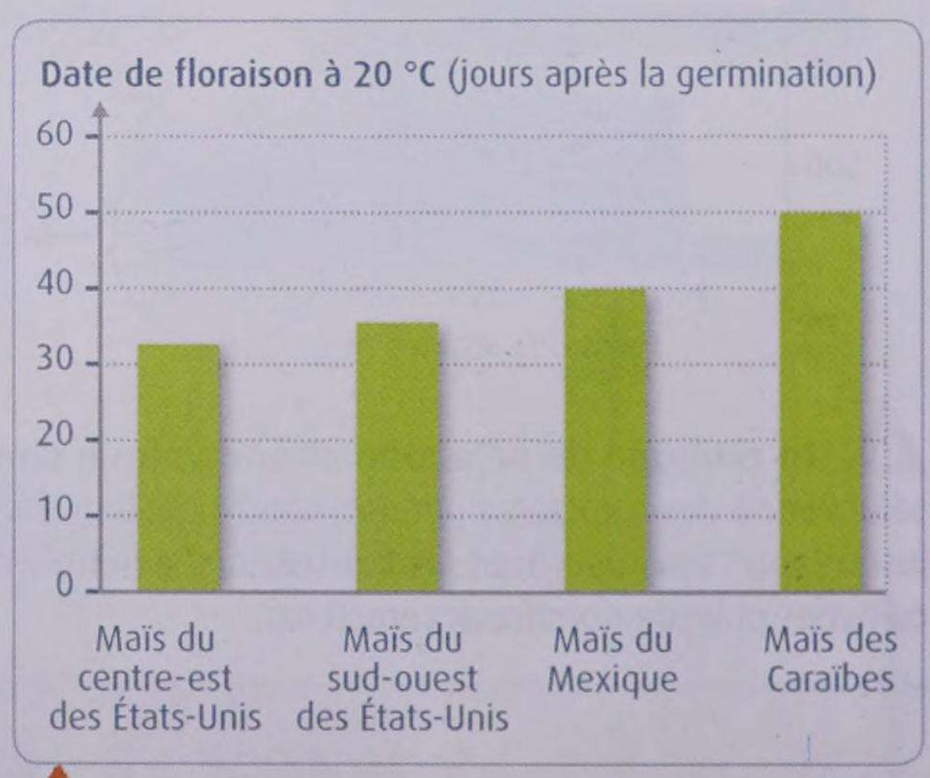
L'exemple du maïs en Amérique du Nord



1 Distribution géographique de la téosinte et de différentes variétés anciennes de maïs. Selon leur région d'habitation, les populations amérindiennes cultivaient, avant l'arrivée des Européens, des variétés différentes de maïs (que l'on qualifie ici de « variétés anciennes »). La téosinte est le plus proche parent sauvage du maïs.

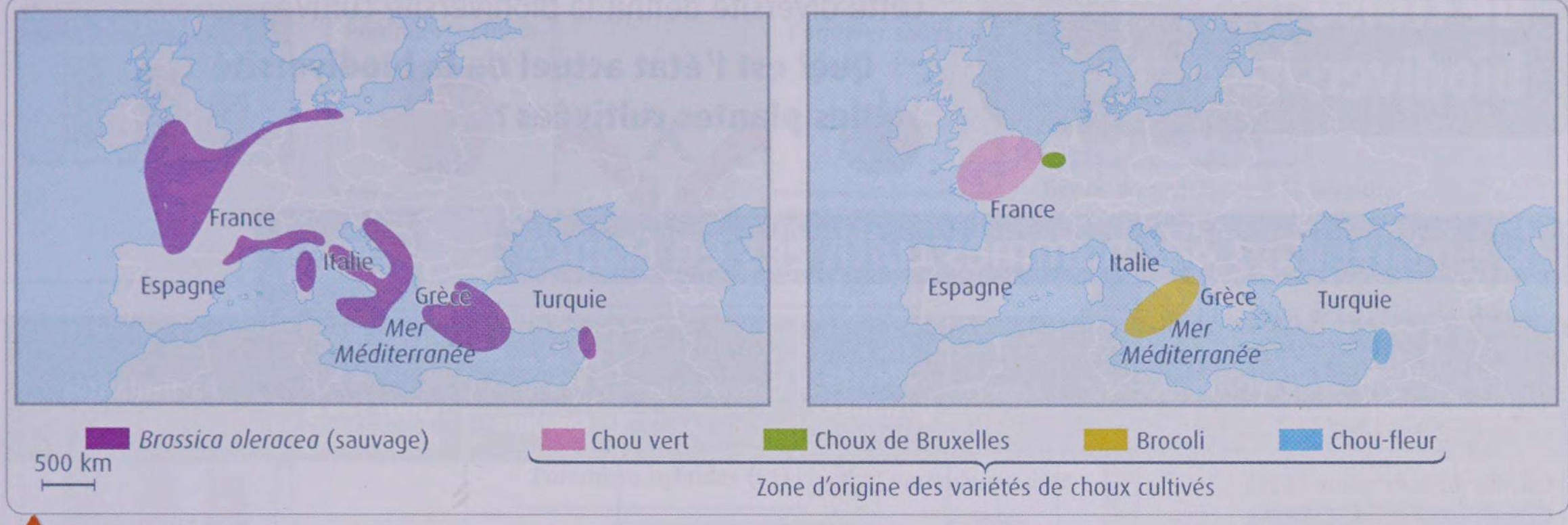


2 Relations de parenté entre la téosinte et les variétés anciennes de maïs américain. On observe un unique événement de domestication des maïs à partir de la téosinte. Les différentes populations amérindiennes ont ensuite effectué une sélection artificielle à l'origine des diverses variétés anciennes de maïs (sélection variétale).

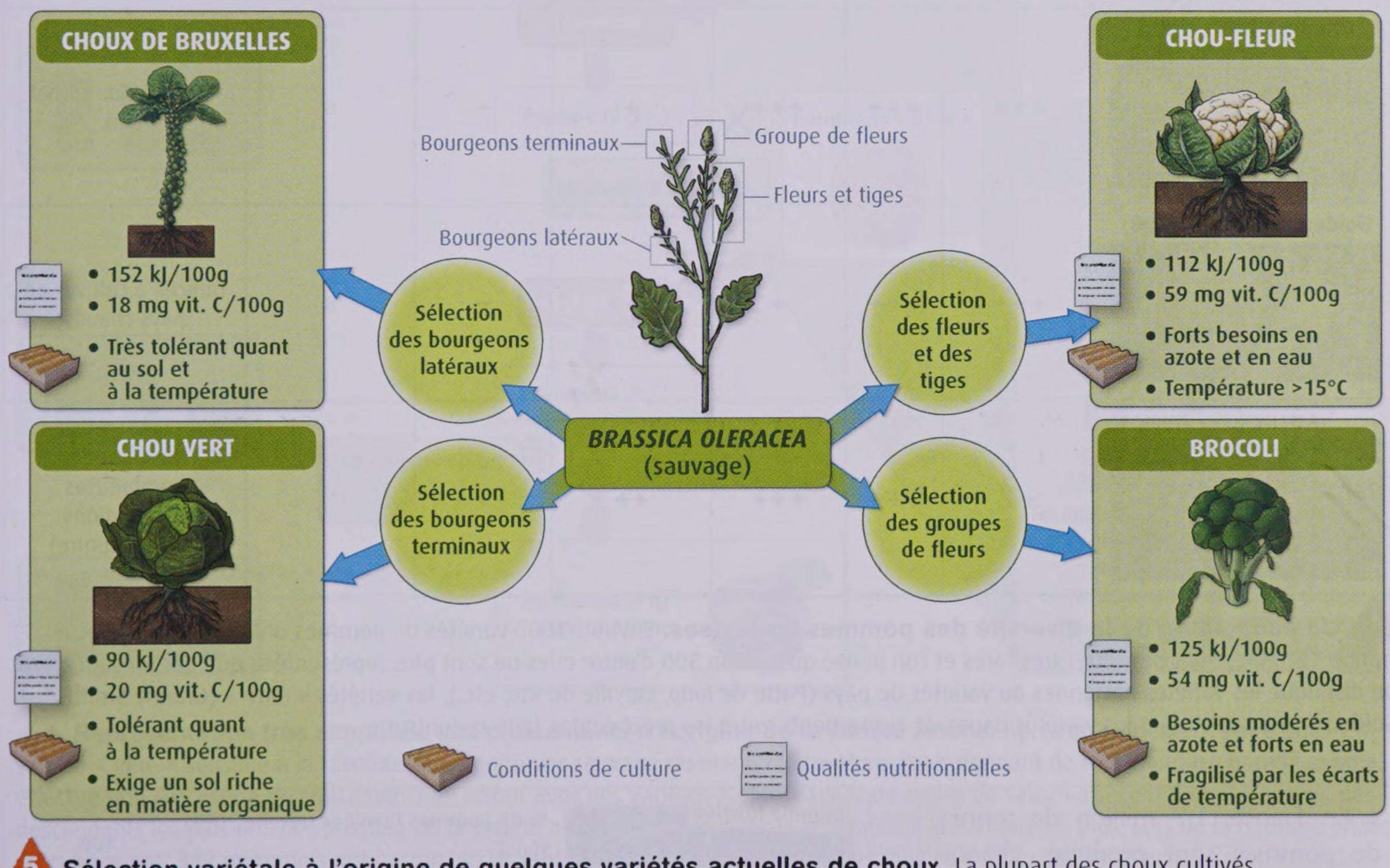


3 Date de floraison de quelques variétés anciennes de maïs d'Amérique du Nord. Plus les variétés sont au sud, plus elles sont tardives, c'est-à-dire exigeantes en chaleur pour la floraison. Par ailleurs, les variétés de la zone tropicale ont une plus forte productivité (jusqu'à 3 mètres de hauteur) que les variétés du nord (2 mètres de hauteur maximum).

L'exemple des choux



4 Répartition de l'ancêtre sauvage des choux et zone d'origine de quelques variétés de choux cultivés.
Dans différentes régions, plusieurs domestications ont été réalisées indépendamment à partir de l'espèce sauvage *Brassica oleracea*. Elles sont à l'origine des différentes variétés de choux cultivés que nous connaissons aujourd'hui.



5 Sélection variétale à l'origine de quelques variétés actuelles de choux. La plupart des choux cultivés ont un ou plusieurs organes hypertrophiés.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Montrez que la sélection de nouvelles variétés de maïs s'est effectuée géographiquement de proche en proche.

2 **DOC. 3.** Déterminez l'un des facteurs de sélection à l'origine de la diversité des variétés anciennes de maïs.

3 **DOC. 1 À 4.** Comparez la domestication et la sélection variétale chez le maïs et chez le chou.

4 **DOC. 5.** Déterminez quelques facteurs de sélection à l'origine de la diversité des variétés des choux et quelques conséquences de cette sélection.

5 **EN CONCLUSION.** En vous appuyant sur les exemples du maïs et du chou, récapitulez les modalités de la sélection variétale exercée par l'Homme et quelques-unes de ses conséquences.

UNITÉ 4

Techniques de croisement et biodiversité cultivée

Des débuts de la domestication à nos jours, la sélection variétale effectuée par l'Homme a été à l'origine d'une riche diversité de plantes cultivées à travers le monde. Cette diversité définit la biodiversité cultivée.

Quel est l'état actuel de la biodiversité des plantes cultivées ?

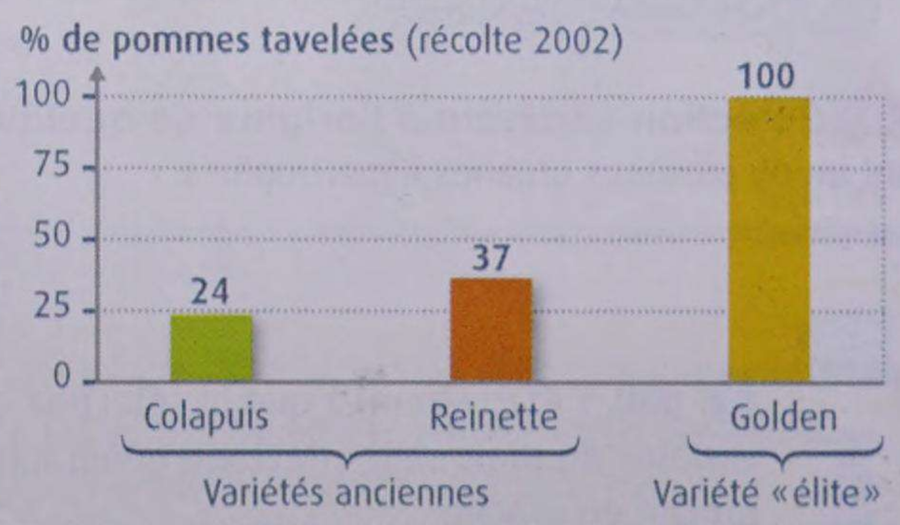
La biodiversité des pommes cultivées en France

Variété (connue depuis ...)	Productivité	Aspect	Qualités gustatives	Conservation	Résistance à la tavelure	Teneur en vitamine C (mg/100 g de pomme)	Particularités
Calville du Roi (avant 1628)	+	+	++	+++	+	15	• Se conserve presque un an • Se cultive bien en montagne
Granny Smith (1868)	+++	+++	+++	+	–	6	Nécessite un climat doux
Golden Delicious (1890)	+++	+++	+	+++	–	8	Difficile à cultiver en pays chauds
Ariane (1979)	++	+++	+++	++	+++	5	Résultat de nombreuses hybridations (voir ci-contre)

1 Un échantillon de la diversité des pommes françaises. Environ 4 000 variétés de pommes ont été répertoriées en France. Certaines sont devenues très rares et l'on pense qu'environ 500 d'entre elles ne sont plus représentées que par un seul arbre. On distingue les variétés anciennes ou variétés de pays (Patte de loup, Calville du Roi, etc.), les variétés « élite » (Granny Smith, Golden Delicious, etc.) et les variétés issues de croisements entre les précédentes (voir ci-contre).

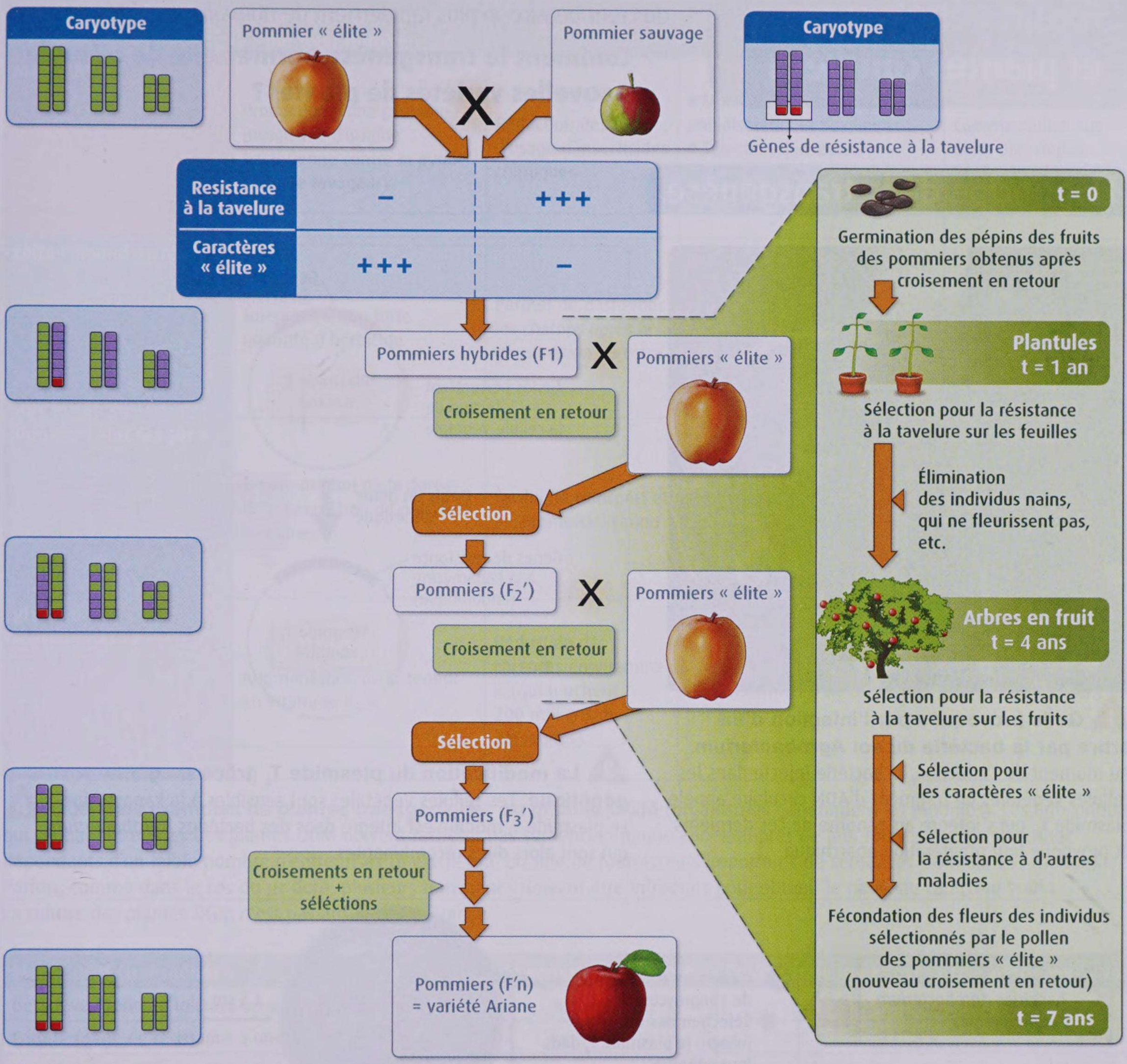
- En France, 1,7 million de tonnes de pommes sont produites chaque années. Dix variétés couvrent 93 % de la production. Toutes sont des variétés « élite ».
- La FAO estime que, depuis le début du siècle, quelque 75 % de la diversité génétique des plantes cultivées ont été perdus.
- Aux États-Unis, 97 % des variétés de fruits et légumes ont été perdues.

2 Quelques chiffres.



3 Pourcentage de pommes tavelées au moment de la récolte sur différentes variétés en l'absence de traitement fongicide. La tavelure est une maladie provoquée par un champignon. Les pommes atteintes (tavelées) sont traitées par des fongicides (jusqu'à 20 traitements par an).

La création d'une nouvelle variété de pommes



4 Représentation très simplifiée des croisements à l'origine de la variété Ariane. Après un croisement entre une variété « élite » sensible à la tavelure et un pommier sauvage résistant à la tavelure, mais donnant de toutes petites pommes, on a effectué une succession de croisements en retour avec des variétés « élite » suivis de cycles de sélections. Le but était d'obtenir des descendants les plus proches possible de la variété « élite » initiale, avec la résistance à la tavelure en plus. Lors de la dernière phase de croisement, 313 pommiers ont germé, 65 étaient résistants à la tavelure sur les feuilles et ont subi les sélections supplémentaires, 9 ont été conservés et ont fleuri. Un seul a passé le nouveau cycle de sélections : il est à l'origine de la variété ariane.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Identifiez quelques caractères qui sont recherchés dans la sélection des variétés commercialisées à grande échelle.

2 **DOC. 1 À 3.** Montrez l'importance du maintien de la biodiversité cultivée.

3 **DOC. 4.** À l'aide de vos connaissances sur la méiose et la fécondation, expliquez l'évolution du génome et du phénotype des pommes au cours des croisements. Quelle sont les limites de cette méthode ?

4 **EN CONCLUSION.** En vous appuyant sur l'exemple des pommes, récapitulez quelques données importantes concernant l'état actuel de la biodiversité cultivée.

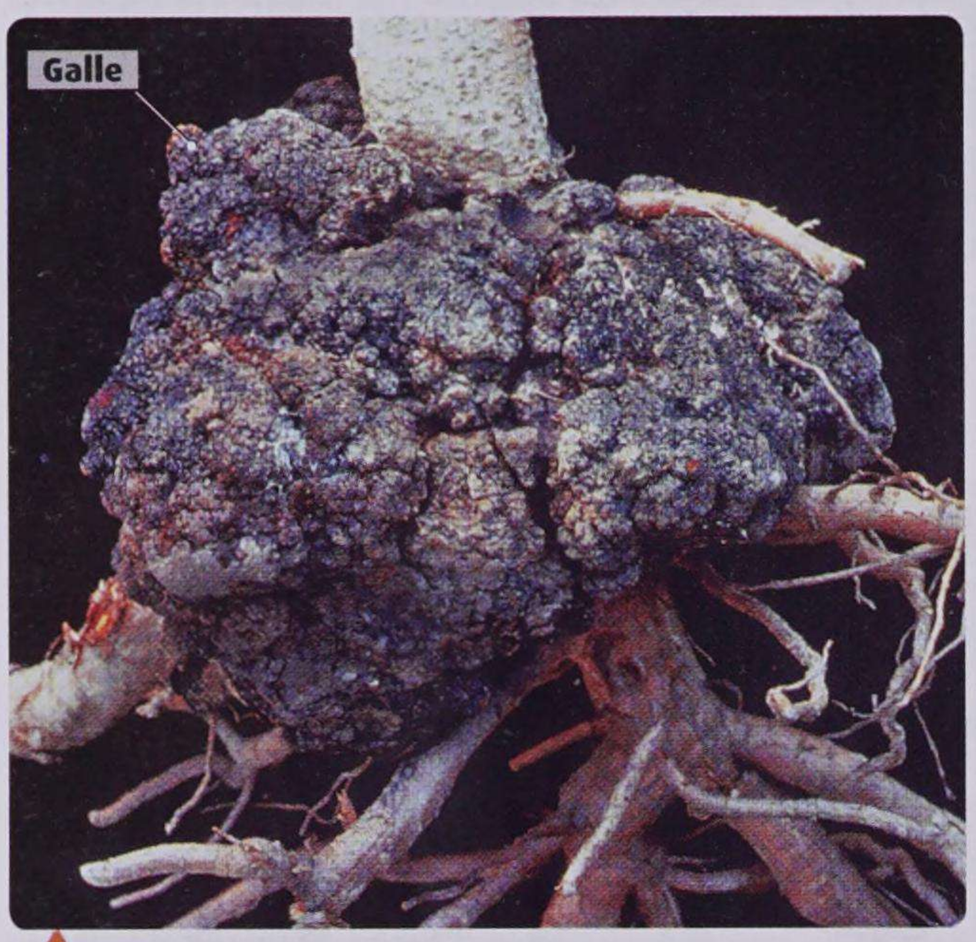
UNITÉ 5

Génie génétique et plantes cultivées

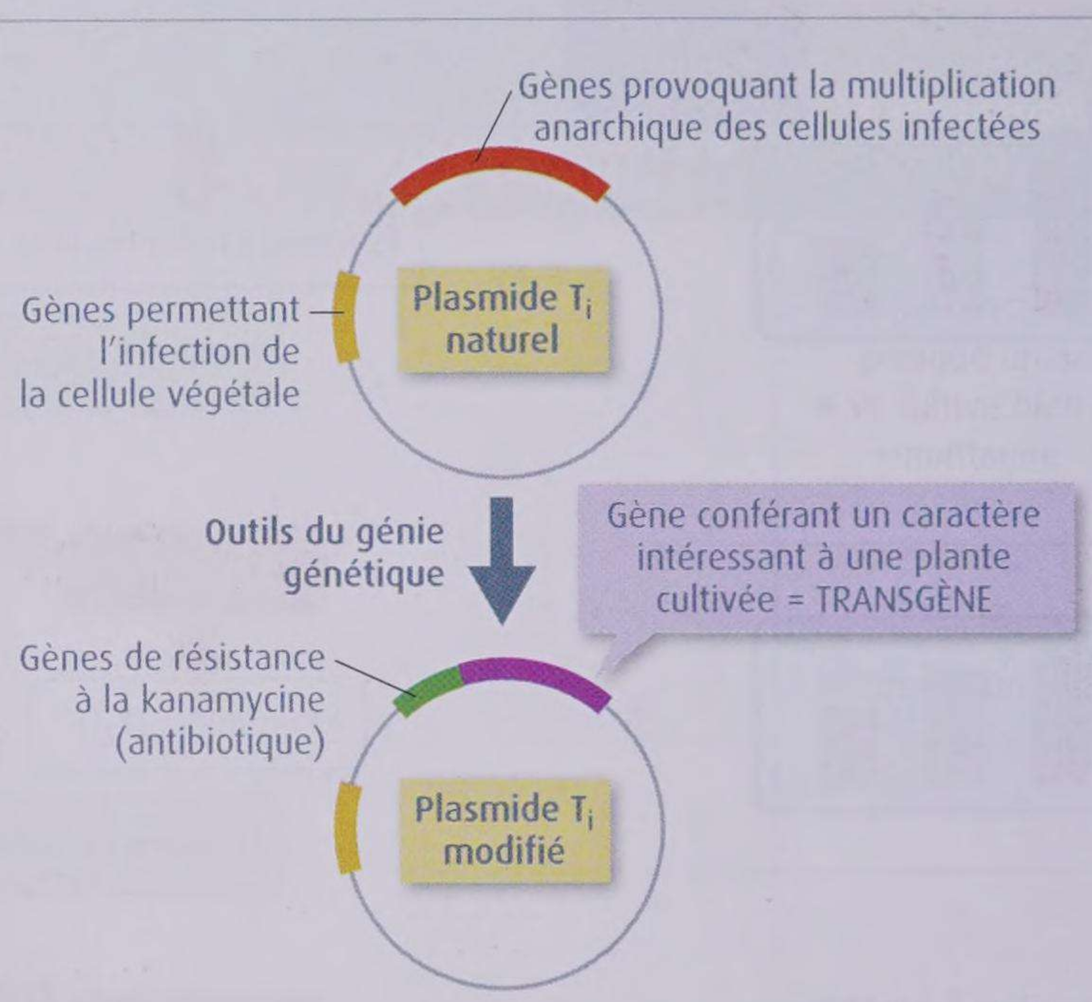
En pratiquant des croisements, les agronomes peuvent obtenir de nouvelles variétés. Mais ces techniques sont longues et fastidieuses. La transgénèse, qui implique les outils du génie génétique, permet de créer beaucoup plus rapidement de nouvelles variétés.

Comment la transgénèse permet-elle de créer de nouvelles variétés de plantes ?

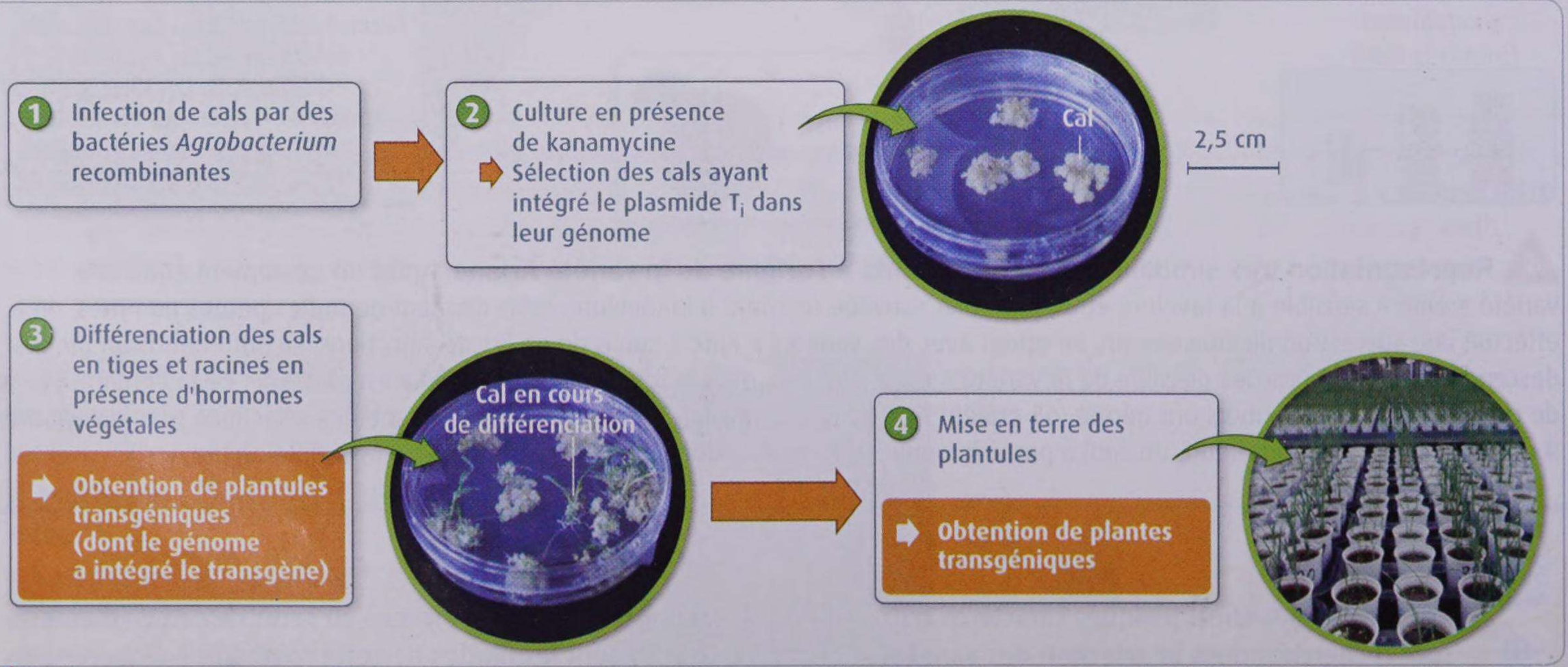
Le principe de la transgénèse



1 Galle provoquée par l'infection d'un arbre par la bactérie du sol *Agrobacterium*. Au moment de l'infection, la bactérie injecte dans les cellules végétales un fragment d'ADN circulaire appelé plasmide T_i, qui s'intègre au génome de ces dernières et provoque leur prolifération anarchique.



2 La modification du plasmide T_i grâce au génie génétique. Les cellules végétales sont sensibles à la kanamycine. Le plasmide T_i modifié est intégré dans des bactéries *Agrobacterium*, qui sont alors dites recombinantes.



3 Les étapes de la transgénèse végétale. La transgénèse consiste à insérer, dans le génome d'une espèce, un gène d'une autre espèce (qualifié de transgène), afin d'introduire un nouveau caractère chez l'espèce de départ. La transgénèse végétale est pratiquée sur des cals (amas de cellules végétales indifférenciées obtenus par multiplication *in vitro* de cellules de la plante dont on veut modifier le génome). En présence d'hormones végétales, les cals se différencient en tiges et racines.
Il s'écoule environ 2 ans entre la modification du plasmide T_i et l'obtention des plantes transgéniques.

Applications et débats liés à la transgénèse végétale

Plante OGM	Caractéristique apportée par le(s) transgène(s)	Avantages	Risques/problèmes	Statut
Maïs « BT »	Production d'une protéine insecticide d'origine bactérienne contre la pyrale (insecte ravageur)	Réduction des coûts d'usage d'insecticides chimiques	• Mortalité accrue des insectes pollinisateurs et auxiliaires • Sélection d'insectes résistants à la protéine insecticide	Commercialisé aux États-Unis depuis 1995
Colza « Round-up ready »	Tolérance à une forte quantité d'herbicide	Permet de désherber les champs après la germination du colza	• Transfert des gènes de résistance à l'herbicide à d'autres plantes • Utilisation accrue d'herbicide	Commercialisé aux États-Unis depuis 1997
Tomate « Mac Gregor »	Augmentation de la durée de conservation de plusieurs semaines	Facilite le transport et la commercialisation	L'absence de pourrissement rend difficile la perception de la fraîcheur du fruit	Commercialisé aux États-Unis depuis 1994
Riz doré	Augmentation de la teneur en vitamine A	Réduction des carences en vitamine A (qui touchent 200 millions de personnes)	L'obtention d'un effet implique de consommer 9 kg de riz cuit par jour	En développement

4 Quelques exemples de plantes transgéniques ou plantes OGM (organismes génétiquement modifiés). Les agriculteurs qui souhaitent utiliser des plantes OGM doivent racheter des semences chaque année auprès de leur fournisseur. Ils sont donc dépendants d'un faible nombre d'entreprises (il existe une dizaine de fournisseurs importants de semences OGM dans le monde). Parfois, comme dans le cas du riz doré, plusieurs transgènes doivent être introduits pour obtenir le nouveau caractère voulu.
La culture des plantes OGM n'est pas autorisée en France.

Plante OGM (transgène)	Échanges de gènes entre variétés	Échanges de gènes avec des espèces sauvages
Betterave (gène de tolérance à un herbicide)	+	++
Carotte (gène de résistance à une maladie)	++	++
Maïs (gène de tolérance à herbicide)	++	0
++/+/0 : échanges importants/faibles/nuls		

5 Une étude de quelques plantes OGM. Les espèces végétales échangent facilement leurs gènes, notamment par hybridation entre variétés ou entre espèces. On a évalué, en Europe, la fréquence des échanges de gènes entres plusieurs plantes OGM et des variétés de la même espèce ou des espèces sauvages proches. Contrairement au maïs, la betterave et la carotte ont été domestiquées en Europe.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 3.** Récapitulez les étapes de la transgénèse et déterminez l'un de ses avantages par rapport aux techniques de croisement.
2. **DOC. 2.** Indiquez quel élément doit être connu concernant le caractère à introduire dans une plante OGM.
3. **DOC. 4.** Déterminez pour qui les différentes plantes OGM citées présentent un avantage.
4. **DOC. 5.** Identifiez s'il y a un risque lié à l'utilisation des plantes OGM citées. Expliquez pourquoi ce risque est plus élevé pour certaines espèces.
5. **EN CONCLUSION.** Rédigez un texte présentant quelques avantages et risques liés à la production de plantes OGM.

CHAPITRE 2

La plante domestiquée

UNITÉ 1 L'origine des espèces cultivées

• Les espèces cultivées sont issues de la modification d'espèces sauvages par l'Homme au cours d'un processus appelé domestication. Pour chaque espèce cultivée, la domestication a eu lieu dans une ou plusieurs régions, depuis – 10 000 ans environ. Dans ces régions, appelées foyer de domestication, on observe des espèces sauvages ressemblant à l'espèce cultivée concernée et l'on trouve généralement les plus anciens vestiges archéologiques témoignant de sa culture par l'Homme.

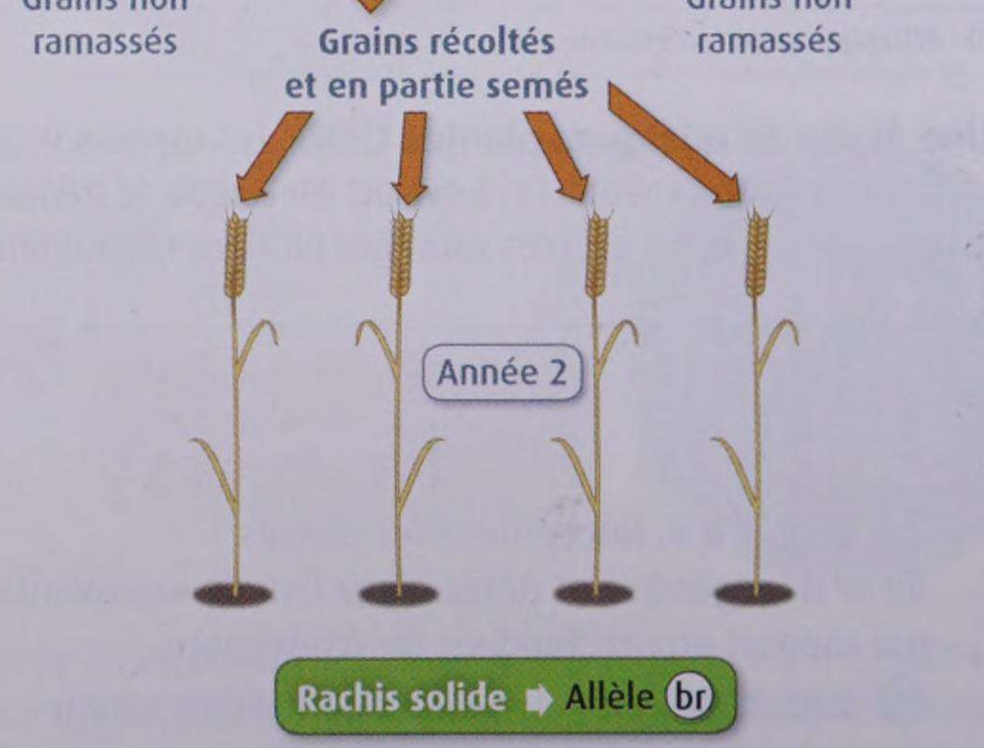
• Une espèce cultivée diffère des espèces sauvages proches par différents caractères qui facilitent sa culture, sa récolte et son utilisation par l'Homme. Ces caractères, qui constituent le syndrome de domestication, sont souvent défavorables à la vie de la plante en milieu naturel. Cela explique que l'on ne rencontre jamais les espèces cultivées dans les écosystèmes naturels. Ces caractères ont été acquis au cours d'un processus de sélection artificielle réalisé par l'Homme : parmi la diversité naturelle des individus d'espèces sauvages, l'Homme a favorisé la reproduction de ceux qui présentaient les caractères qu'il recherchait. Dans le cas où ces caractères étaient héréditaires, leur fréquence a ainsi augmenté d'une génération à la suivante. Ce processus de sélection artificielle est à la base de la domestication. Il est à l'origine des premières espèces cultivées.

UNITÉ 2 Les bases génétiques de la domestication

• Les individus sélectionnés par l'Homme au cours de la domestication sont le résultat de modifications génétiques spontanées comme l'hybridation entre deux espèces différentes, le doublement des chromosomes après hybridation ou l'apparition de mutations sur certains gènes.

• Les caractéristiques phénotypiques distinguant une espèce cultivée des espèces sauvages proches sont associées à certains allèles de quelques gènes. Ces caractéristiques étant d'origine génétique, elles ont pu faire l'objet d'une sélection par l'Homme : en favorisant la reproduction des individus porteurs de ces allèles, ce dernier a pu augmenter leur fréquence (et celle des caractères phénotypiques associés) d'une génération à la suivante.

• La sélection des individus porteurs des allèles concernés s'est effectuée au moment de la récolte ou du semis sur la base des caractères phénotypiques (sélection phénotypique). Ainsi, chez les blés, seuls les grains issus d'épis à rachis solides pouvaient être récoltés puis ressemés, puisque les grains issus d'épis à rachis cassants tombaient au sol. De même, afin d'augmenter la taille des grains de la récolte à venir, les agriculteurs semaient les grains les plus gros de la récolte précédente. Selon les caractères, la sélection a pu ainsi être volontaire (taille des grains) ou involontaire (solidité du rachis).



Un exemple de sélection phénotypique involontaire : la solidité du rachis et l'allèle *br*.

UNITÉ 3 La sélection variétale

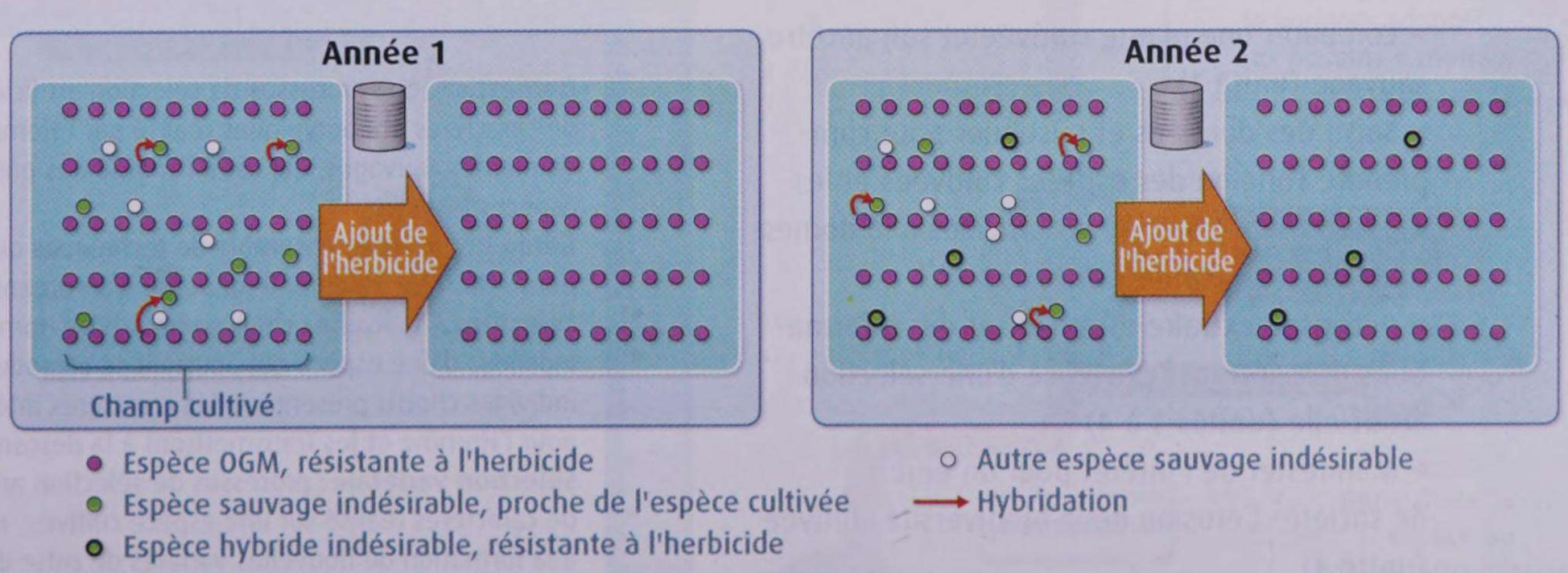
- Après la domestication, les plantes cultivées ont continué d'être soumises à la sélection artificielle : c'est la phase de sélection variétale, à l'origine de la grande diversité de variétés des plantes cultivées.
- Dans le cas du maïs, la domestication a eu lieu en un unique foyer localisé au Mexique. Or, sur le continent américain, les variétés anciennes les plus proches géographiquement sont aussi les plus apparentées. La sélection variétale s'est donc faite de proche en proche à partir du foyer de domestication : chaque nouvelle variété a été sélectionnée à partir des maïs des régions voisines et elle est ainsi adaptée aux conditions climatiques régionales.
- Dans le cas des choux, la sélection variétale a été réalisée à partir de plusieurs foyers de domestication indépendants. Elle a porté (volontairement) sur l'hypertrophie de certains organes, mais également (involontairement) sur la teneur en vitamine C ou les conditions de culture.

UNITÉ 4 Techniques de croisement et biodiversité cultivée

- Encore très importante il y a quelques dizaines d'années, la biodiversité des plantes cultivées, ou biodiversité cultivée, a beaucoup diminué au profit d'un nombre limité de variétés. Par exemple, pour les pommes, les variétés privilégiées, dites « élite », sont celles qui sont les plus productives, ont un bel aspect et se conservent bien. Pourtant, des variétés anciennes et désormais rares peuvent présenter de nombreux atouts.
- La sélection variétale et la création de nouvelles variétés se poursuivent toutefois de nos jours, par exemple grâce à l'amélioration variétale. Cette approche consiste à croiser une variété « élite » avec une variété présentant un caractère avantageux que ne possède pas la variété « élite ». La descendance du croisement est testée et les individus présentant le caractère avantageux sont sélectionnés puis de nouveau croisés avec la variété « élite » (croisement en retour). En renouvelant le cycle croisement/sélection plusieurs fois, on peut obtenir une variété possédant les caractères de la variété « élite » et le nouveau caractère avantageux. Le processus est très long.

UNITÉ 5 Génie génétique et plantes cultivées

- Le génie génétique permet d'apporter un nouveau caractère à une espèce cultivée en introduisant dans son génome un gène provenant d'une autre espèce, appelé transgène. À condition de disposer du transgène qui apporte le caractère recherché, on peut ainsi créer rapidement une nouvelle variété. Cette dernière est un organisme génétiquement modifié (OGM).
- En fonction du transgène utilisé, les atouts et les risques liés aux OGM sont variables. En particulier, compte tenu de la forte capacité des végétaux à s'hybrider entre eux, il existe un risque de diffusion des transgènes vers d'autres variétés ou vers des espèces sauvages plus ou moins proches. Ce risque dépend de l'espèce concernée et des espèces de plantes sauvages qui poussent dans la région de culture de l'OGM.



Un exemple de risque lié à l'utilisation d'une variété OGM. Après hybridation entre la variété OGM et l'espèce sauvage, il y a production de graines. Le génome des plantules contenues dans certaines de ces graines peut posséder le gène de résistance à l'herbicide. Ces graines donneront naissance à des plantes hybrides résistantes à l'herbicide.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2

La plante domestiquée

L'essentiel par le texte

La domestication est à l'origine des espèces cultivées

• Les espèces végétales cultivées sont issues de la modification d'espèces sauvages par l'Homme au cours d'un processus appelé domestication, qui s'est déroulé il y a plusieurs milliers d'années.

• La **domestication** d'une espèce est un processus de **sélection artificielle** de caractères génétiques (c'est-à-dire d'allèles) réalisé par l'Homme à partir de plantes sauvages. Ces caractères confèrent à la plante des caractères phénotypiques favorables à sa culture et son utilisation par l'Homme, et ils sont généralement défavorables à la vie de la plante dans le milieu naturel. La domestication est à l'origine des plus anciennes espèces cultivées.

La biodiversité cultivée : source et conséquence de la sélection variétale

• Postérieurement à la domestication, la sélection artificielle a continué d'être pratiquée localement par les agriculteurs : cette phase, dite de **sélection variétale**, est à l'origine des nombreuses **variétés** anciennes de chaque espèce cultivée. Ces variétés sont adaptées à des conditions de cultures locales. Elles ont des caractéristiques agronomiques et nutritionnelles variables.

• L'ensemble des variétés des différentes espèces cultivées constitue la biodiversité cultivée. Celle-ci a considérablement diminué ces dernières décennies. Néanmoins, elle constitue un réservoir de caractères génétiques et phénotypiques qui est utilisé depuis le début du XXe siècle pour créer de nouvelles variétés (variétés modernes).

• La sélection variétale et la création de nouvelles variétés se poursuivent en effet de nos jours. Les nouvelles variétés peuvent être obtenues :

– par une longue et fastidieuse succession de croisements entre des variétés possédant chacune des caractères que l'on veut réunir en une seule variété ;

– grâce aux outils du **génie génétique**, qui permettent de créer plus rapidement une nouvelle variété en ajoutant au génome d'une plante cultivée un gène (qualifié de transgène) qui lui confère un caractère phénotypique intéressant. La plante obtenue est un organisme génétiquement modifié (OGM). Des risques et problèmes potentiels associés aux variétés OGM sont à l'origine d'un débat de société où sont discutés leurs avantages et leurs inconvénients.

Les capacités et attitudes

▸ Comparer une plante cultivée et son ancêtre sauvage **(unité 1)**

▸ Saisir des données et raisonner pour comprendre l'origine des espèces cultivées et les modifications génétiques associées à la domestication d'une plante **(unité 2)**

▸ Recenser, extraire et organiser des informations démontrant l'existence d'une sélection artificielle **(unités 1 à 4)**

▸ Manifester de l'intérêt pour un enjeu de société : l'érosion de la biodiversité cultivée **(unité 4)**

▸ Manifester de l'intérêt pour un débat de société : les OGM **(unité 5)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Domestication : processus de sélection artificielle de caractères phénotypiques réalisé par l'Homme à partir de plantes sauvages, qui est à l'origine des premières espèces cultivées.

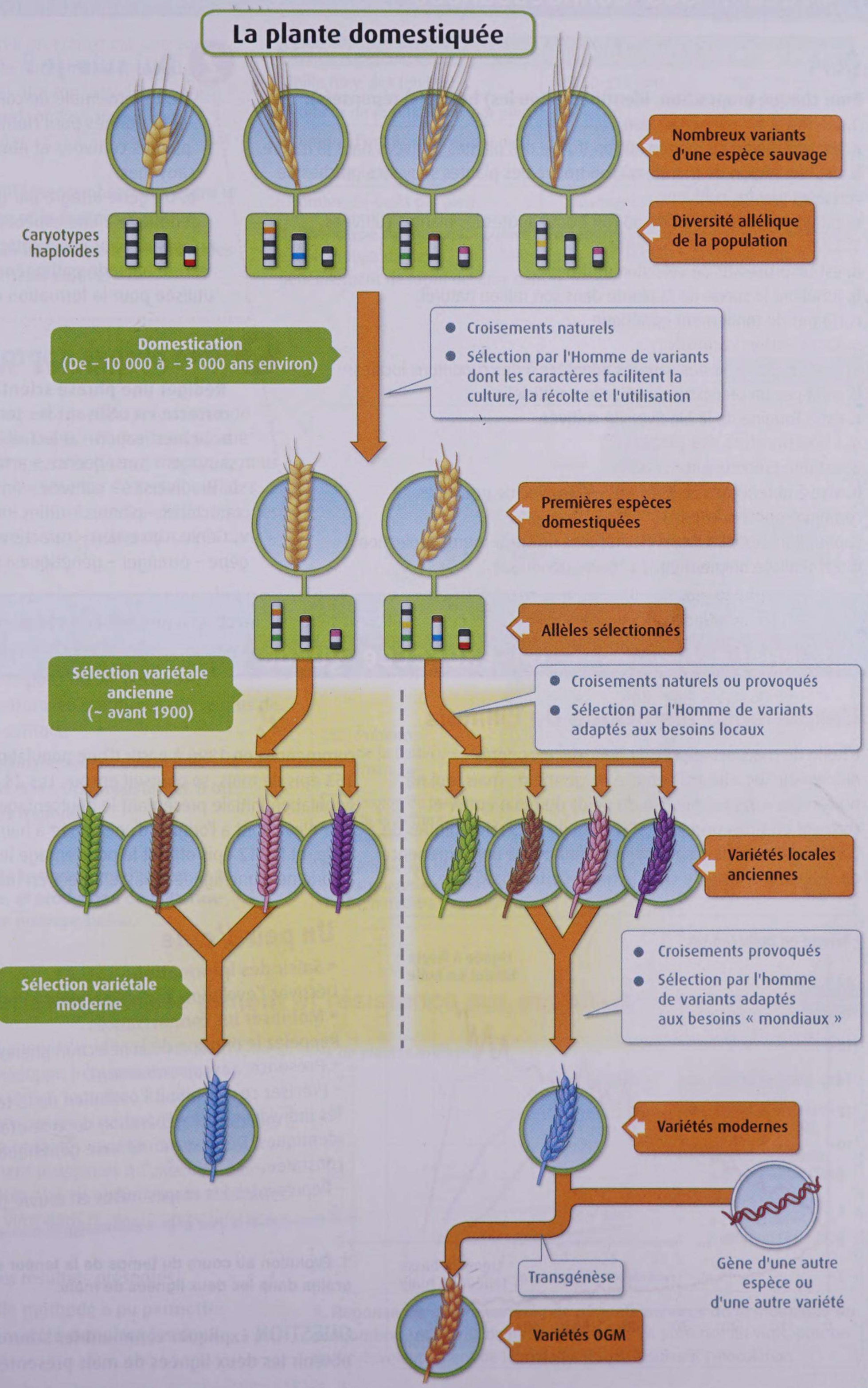
Génie génétique : ensemble de techniques qui permettent de modifier le génome d'un organisme.

Sélection artificielle : choix exercés par l'Homme des individus d'une espèce qui pourront se reproduire. Les individus choisis présentent des caractères intéressants pour l'Homme et les transmettront à la descendance.

Sélection variétale : processus de sélection artificielle de caractères réalisé sur une espèce cultivée, menant à la formation de nouvelles variétés de cette dernière.

Variété : une espèce cultivée existe sous différentes variétés qui présentent des variations dans leurs caractères agronomiques et nutritionnels.

L'essentiel par l'image



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Un foyer de domestication :

a. est une région du monde où l'on trouve des plantes cultivées dans la nature.
b. est une région du monde où l'on trouve des plantes sauvages proches de certaines plantes cultivées.
c. est une région du monde où l'on trouve toutes les plantes cultivées.

2. La domestication des plantes :

a. est un processus de sélection artificielle.
b. améliore la survie de la plante dans son milieu naturel.
c. n'a pas de fondement génétique.

3. La sélection variétale :

a. permet d'obtenir des variétés adaptées à des conditions locales.
b. n'est pas un processus de sélection artificielle.
c. est à l'origine de la biodiversité cultivée.

4. L'amélioration des plantes :

a. est une préoccupation récente.
b. vise à obtenir des variétés nouvelles avec de nouvelles combinaisons de caractères.
c. peut faire appel à des cycles répétés de croisement / sélection.
d. est réalisée uniquement par génie génétique.

2 Qui suis-je ?

a. Un ensemble de caractères sélectionnés par l'Homme chez les plantes cultivées et absent des plantes sauvages.
b. Un gène intégré par génie génétique à une espèce végétale mais n'appartenant pas à cette espèce.
c. Une bactérie pathogène des plantes utilisée pour la formation d'OGM.

3 Une phrase appropriée

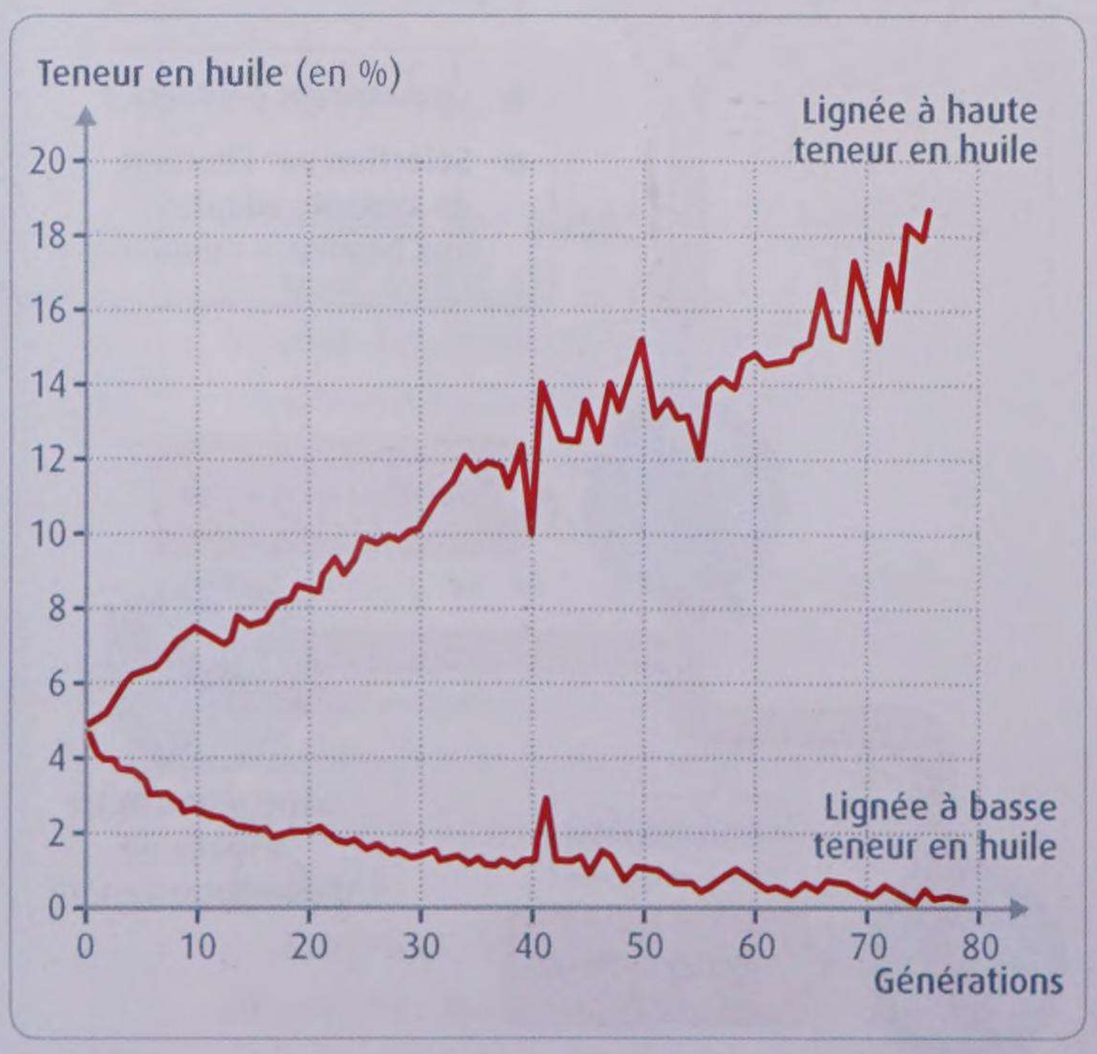
Rédiger une phrase scientifiquement correcte en utilisant les termes suivants :

a. Domestication – sélection – plante sauvage – conséquence – artificielle.
b. Biodiversité – cultivée – amélioration – caractères – plantes – utiles – réservoir.
c. Génie – insertion – caractère – nouveau – gène – étranger – génétique – plante.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 L'expérience historique de l'Illinois

L'huile de maïs est appréciée pour ses propriétés nutritionnelles. Elle est extraite du germe de maïs, qui ne représente environ que 8 % du poids du grain entier et contient en moyenne 45 à 50 % d'huile. Des scientifiques de l'université de l'Illinois (États-Unis) ont mené une expérience de sélection artificielle chez le maïs. Cette expérience, commencée en 1896 à partir d'une population initiale de 163 épis de maïs, se poursuit encore. Les 24 épis de la population initiale présentant le pourcentage en huile le plus élevé sont à l'origine d'une lignée à haute teneur en huile, et les 12 épis offrant le pourcentage le plus faible sont à l'origine d'une lignée à basse teneur en huile.



1. Évolution au cours du temps de la teneur en huile des grains dans les deux lignées de maïs.

QUESTION Expliquez comment les scientifiques ont pu obtenir les deux lignées de maïs présentées.

Un peu d'aide

- **Saisir des informations**

Décrivez l'évolution des phénotypes.

- **Mobiliser les connaissances**

Rappelez le principe de la sélection phénotypique.

- **Présenter un raisonnement**

– Précisez ce que serait l'évolution de la teneur en huile si tous les individus d'une génération donnée étaient génétiquement identiques. Déduisez-en la base génétique de l'évolution constatée.
– Représentez les étapes mises en œuvre par les scientifiques.

Appliquer ses connaissances

5 Le tournesol sauvage

Analyser des données

Le tournesol cultivé en France est une source importante d'huile alimentaire (produite à partir des graines). Il a été introduit depuis l'Amérique du Nord, où l'on trouve des tournesols sauvages.

1. Décrivez les différences observées entre le tournesol sauvage et le tournesol cultivé.
2. Présentez les avantages pour l'Homme des caractères du tournesol cultivé.

Caractère	Tournesol cultivé	Tournesol sauvage
Taille moy. des feuilles	300-315 cm²	180-270 cm²
Nombre de ramifications par pied	0	12 à 16
Nombre d'inflorescences par pied	1	40 à 50
Poids des fruits	55-65 mg	9-10 mg
Nombre de fruits par pied	environ 1500	environ 100

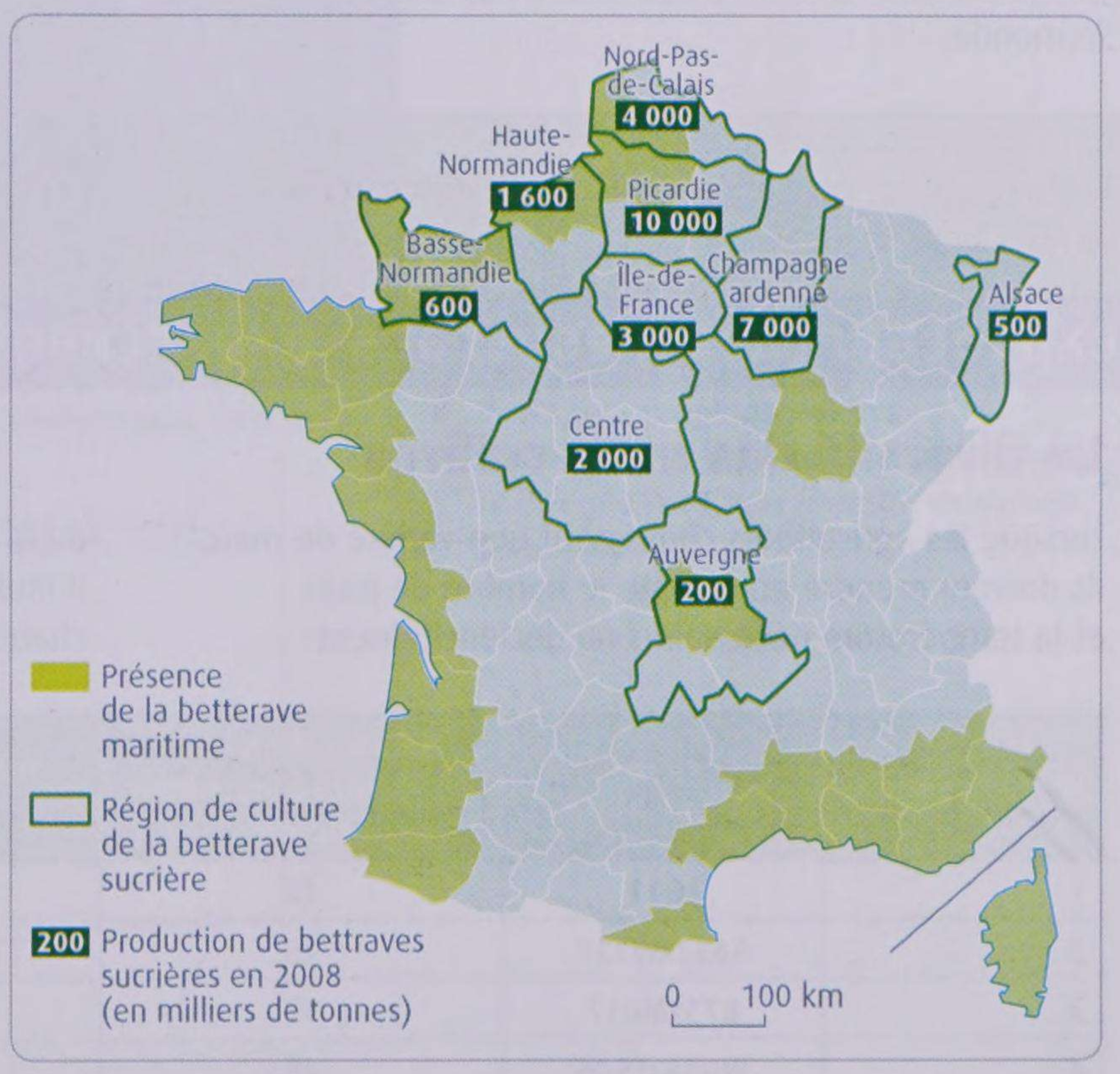
1. Phénotype du tournesol cultivé et du tournesol sauvage. Une inflorescence est un groupe de fleurs. Les inflorescences d'un même pied fleurissent généralement de façon décalée dans le temps.

6 La betterave sucrière

Analyser des données

La betterave sucrière est la principale source de sucre en France. Elle est génétiquement proche d'une espèce sauvage, la betterave maritime, mais s'en distingue par la présence de certains allèles. Des chercheurs ont montré que les allèles typiques des variétés cultivées sont parfois retrouvés dans les populations sauvages.

1. Expliquez la présence d'allèles typiques des betteraves cultivées dans les populations sauvages.
2. Identifiez les régions où les betteraves cultivées et les betteraves maritimes ont le plus de chance d'être en contact.
3. Présentez les conséquences éventuelles de la culture de betteraves OGM résistantes à un herbicide dans ces régions.



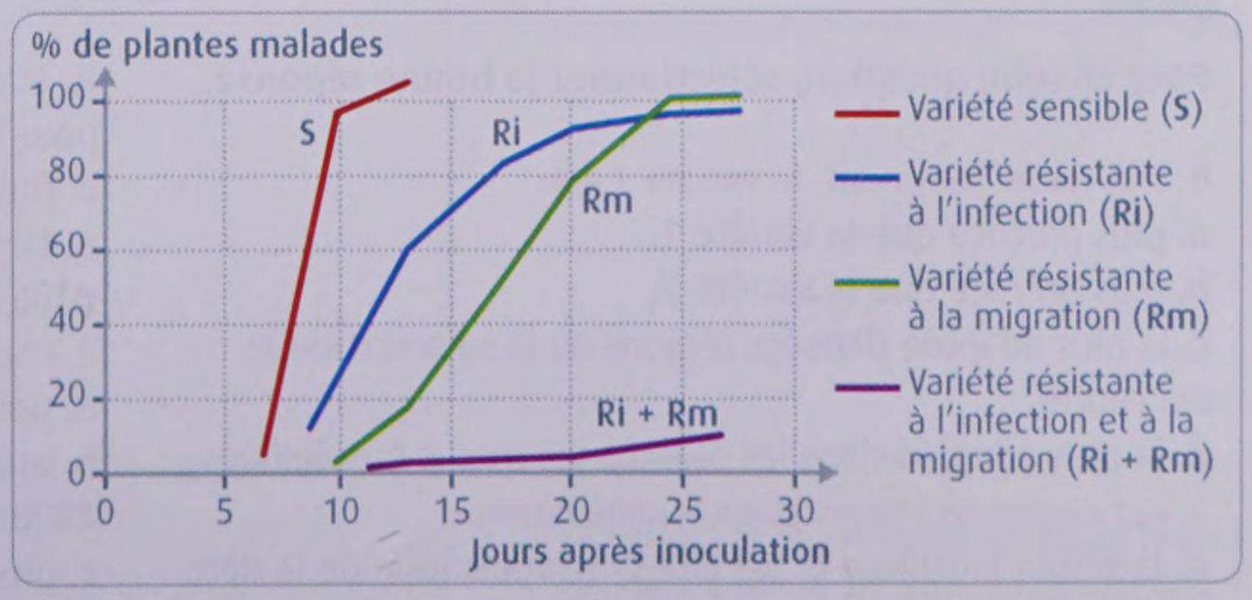
1. Répartition de la betterave maritime et de la betterave sucrière, et production de betterave sucrière en France métropolitaine.

7 Diversité variétale chez le piment et résistance aux maladies

Raisonner

Une maladie d'origine virale, la mosaïque du concombre, se développe fréquemment chez le piment cultivé en région tempérée. Le virus est transmis à la plante par les pucerons. Des chercheurs ont remarqué que certaines variétés brésiliennes étaient partiellement résistantes à l'infection, alors que d'autres variétés étaient partiellement résistantes à la migration du virus dans la plante après infection.

1. Commentez les résultats présentés.
2. Indiquez quelle méthode a pu permettre l'obtention d'une variété cumulant les deux résistances.



1. Réponse de quatre variétés de piments au virus de la mosaïque du concombre. Les plants de piments sont mis en présence du virus, puis on suit le développement de la maladie les jours suivant l'inoculation.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 Les variations du flux et du gradient géothermique

L'exploitation de l'énergie géothermique permet de satisfaire une fraction de nos besoins énergétiques. Mais toutes les régions du monde ne présentent pas le même potentiel de développement de cette ressource énergétique.

QUESTION Montrez que le flux et le gradient géothermiques varient selon le contexte géodynamique, en vous appuyant sur trois exemples choisis de façon pertinente.

2 Les modifications de la biodiversité cultivée

Dès les débuts de la domestication, l'action de l'Homme a été à l'origine d'une riche diversité de plantes cultivées à travers le monde.

QUESTION Montrez à l'aide d'exemples comment l'Homme modifie la biodiversité cultivée.

Exploiter des résultats expérimentaux

3 points

3 La diversité des maïs cultivés

Lorsque les agriculteurs choisissent une variété de maïs, ils doivent prendre en compte le nombre de jours et la température nécessaires au déclenchement de la floraison. Dans les régions tempérées par exemple, il faut que les pieds fleurissent rapidement car la saison chaude est courte, contrairement aux régions tropicales.

N° de la variété	Nom de la variété	Nombre de jours à 20 °C nécessaires pour fleurir	Nombre total moyen de feuilles	Surface foliaire maximale totale (m²)
1	LG11	40	15,00	0,406
2	A632xW117	45	18,75	0,657
3	B73xMo17	52	19,95	0,752
4	W64AxF546	48	18,67	0,685

1 Étude de trois caractères phénotypiques pour 4 variétés de maïs cultivées.

QCM

Pour chaque question, sélectionnez la bonne réponse.

1. D'après le document, la variété 2 est :

a. plus précoce que la variété 1.
b. plus précoce que la variété 3.
c. la plus adaptée dans les régions où la saison chaude est courte.
d. la plus adaptée dans les régions les moins ensoleillées.

2. Les caractères phénotypiques sélectionnés :

a. facilitent la culture grâce à la synchronisation de la date de floraison.
b. augmentent la production photosynthétique journalière pour les variétés précoces.
c. montrent une corrélation négative entre la précocité et la surface foliaire.
d. illustrent le syndrome de domestication.

3. D'après le document, la variété 1 :

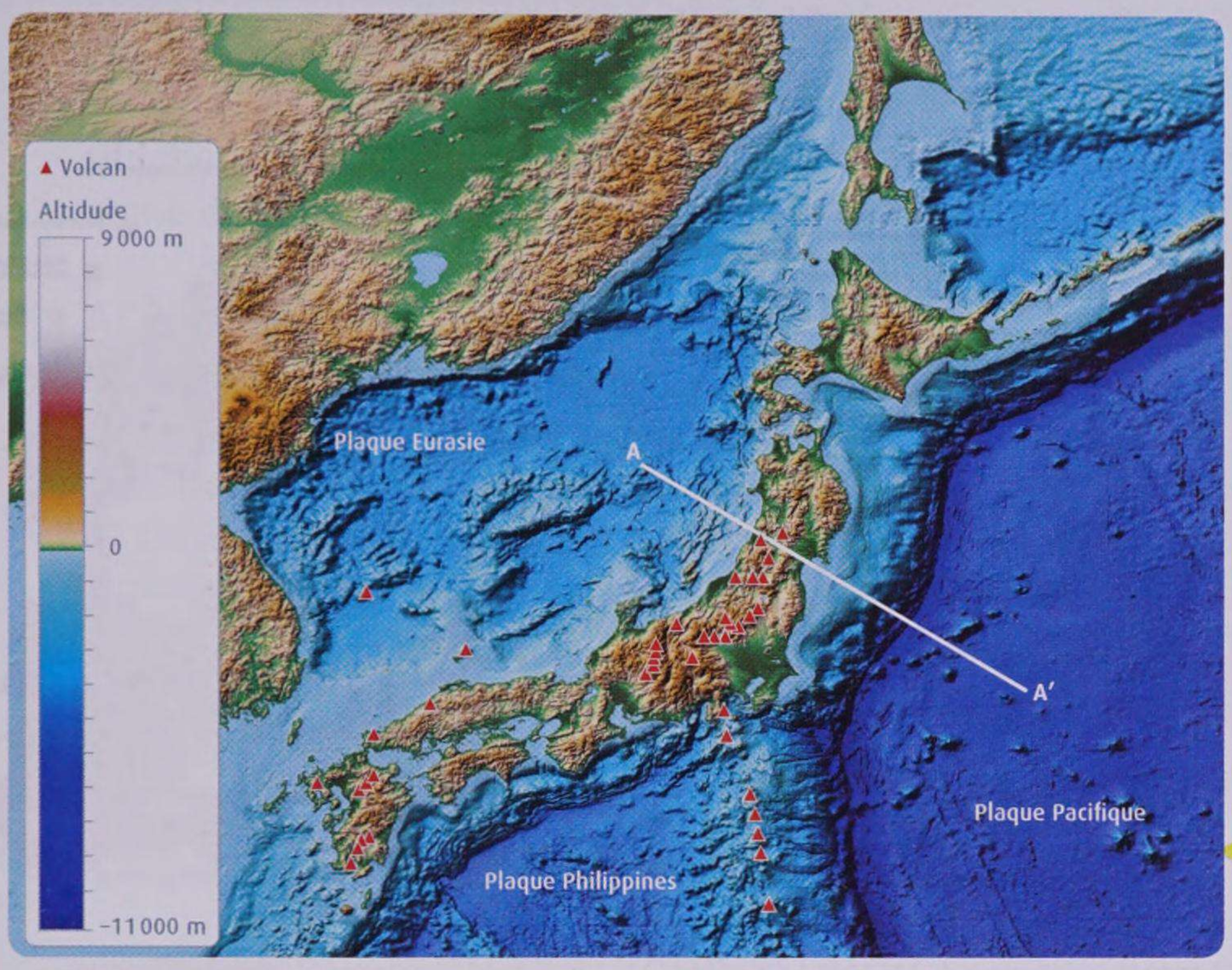
a. pourra fleurir même si la saison chaude est courte.
b. aura une biomasse plus élevée que la variété 4 après 48 jours à 20°.
c. produira plus de glucides que la variété 3 dans une région où la saison chaude est longue.
d. aura dans tous les cas le rendement le plus élevé.

Résoudre un problème scientifique

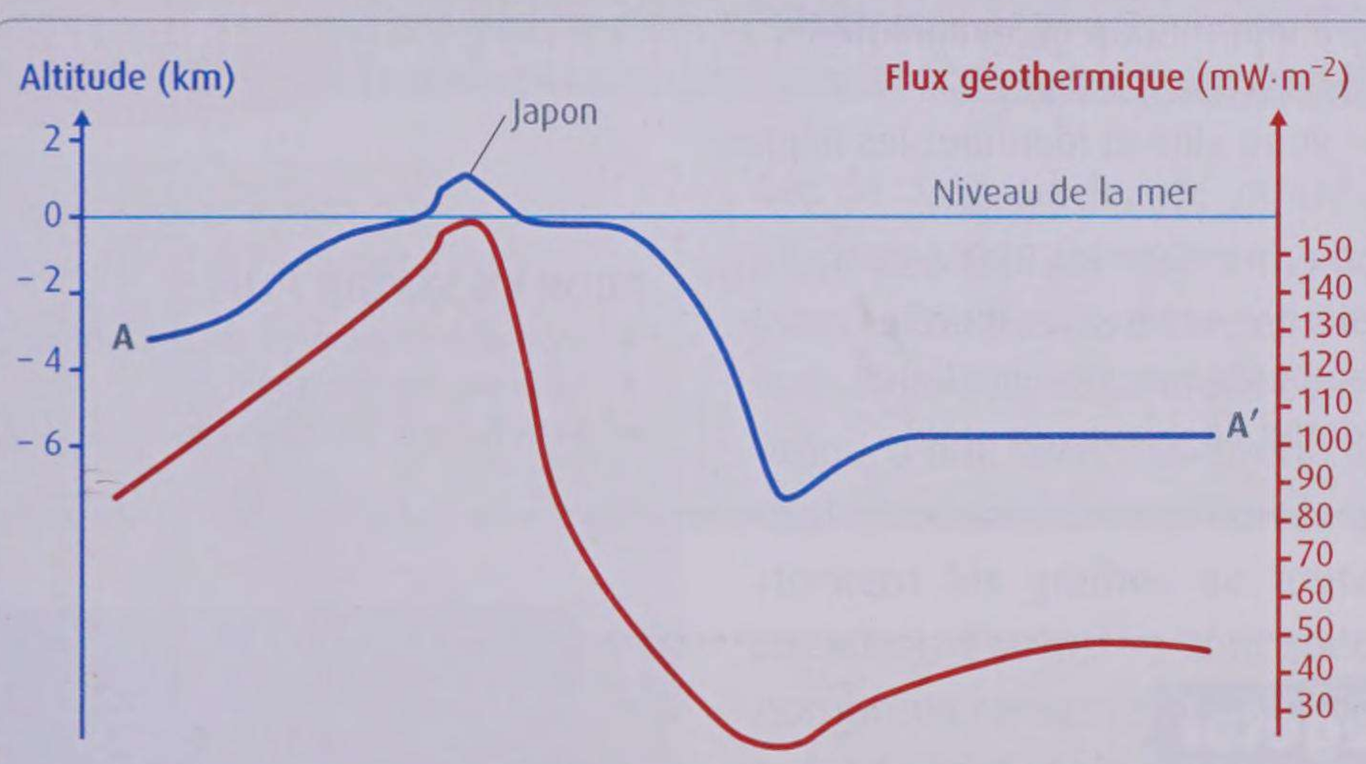
5 points

4 Le potentiel géothermique du Japon

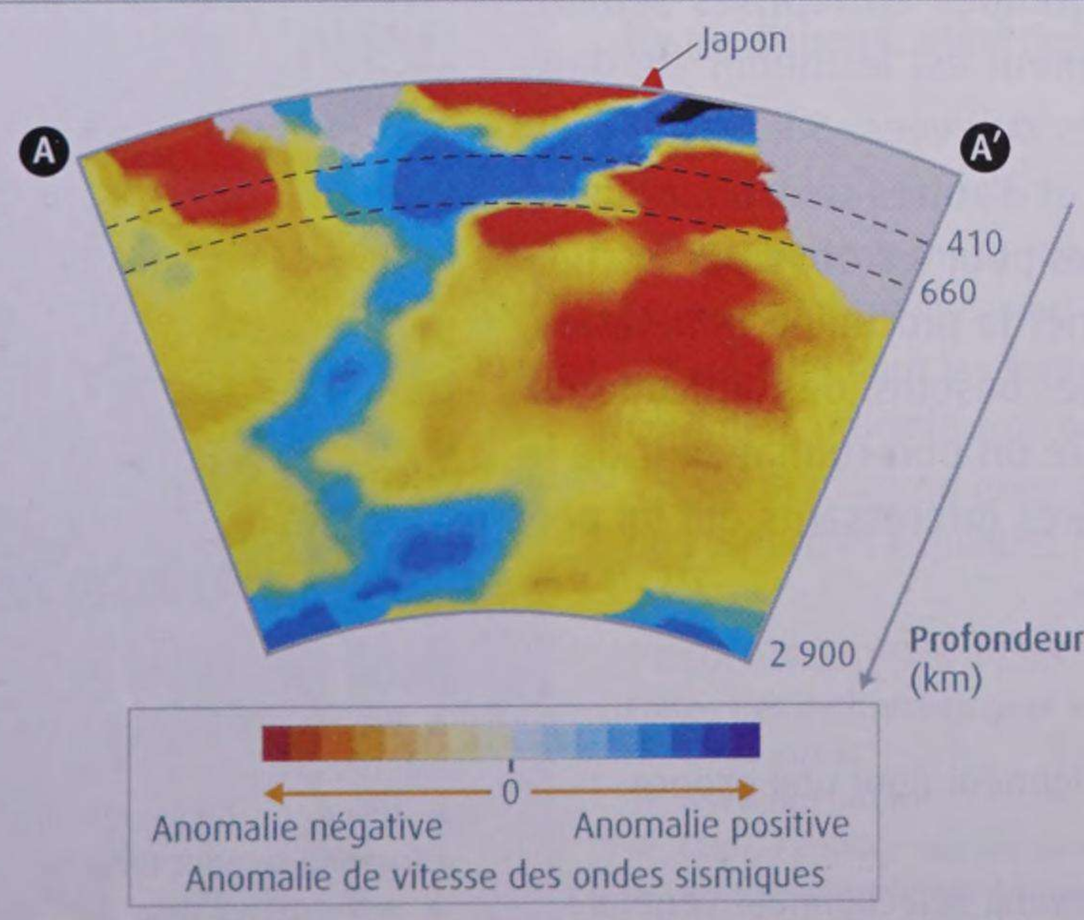
Situé aux frontières des plaques Philippines, Pacifique et Eurasie, le Japon est le lieu d'une intense activité sismique. Par ailleurs, ce pays est le huitième producteur mondial d'électricité géothermique.



1 Carte topographique et volcanique aux frontières des plaques Pacifique, Eurasie et Philippines.



2 Profil topographique et flux géothermique le long de la coupe A–A'.
Le flux géothermique terrestre moyen est de 60 $mW.m^{-2}$.



3 Étude du manteau sous le Japon par tomographie sismique.

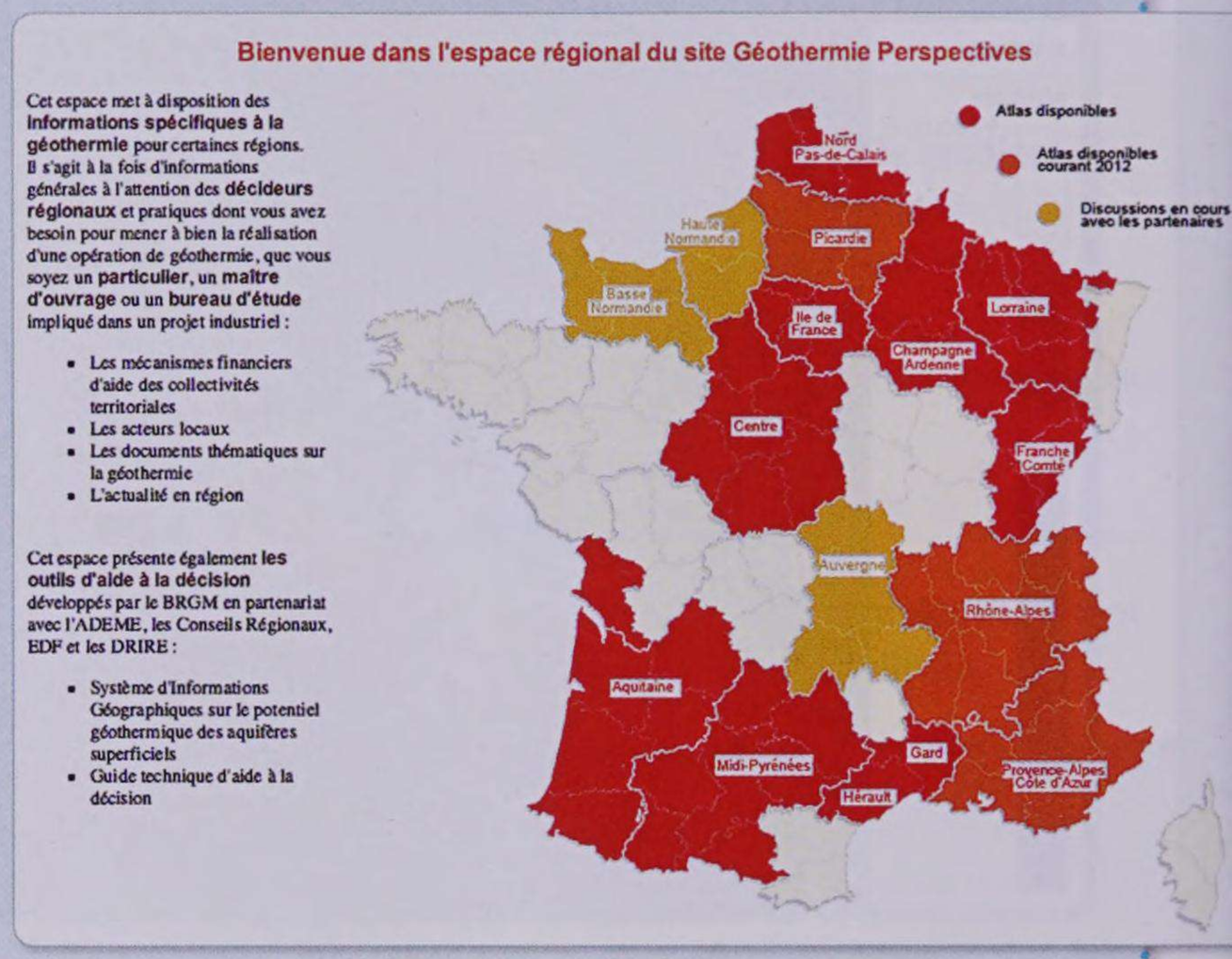
QUESTION À partir de l'exploitation des documents et en mobilisant vos connaissances, montrez que le contexte géodynamique du Japon est propice à la production d'électricité géothermique.

ATELIERS D'EXPLORATION

ENQUÊTE Quel est le potentiel géothermique dans ma ville ?

http://www.geothermie-perspectives.fr

Selon la température des fluides exploités, les utilisations de l'énergie géothermique sont diverses. Au-delà de 90 °C, la production d'électricité est envisageable. En deçà, une exploitation pour le chauffage collectif est possible. Dans tous les cas, il est possible de construire des installations individuelles qui exploitent l'énergie géothermique, récupérée par des fluides mis en circulation dans le sol grâce à des pompes à chaleur.



ACTIVITÉS

1. À l'adresse ci-dessus, cliquez sur « La géothermie en région », puis sur votre région d'habitation. En accédant au « SIG (système d'information géographique) du potentiel géothermique des aquifères superficiels », indiquez le potentiel d'exploitation géothermique de votre ville et identifiez les nappes exploitables.
2. Recherchez des informations sur la géothermie dans les DROM-COM.
3. Réalisez un petit dossier dans lequel vous présenterez les diverses utilisations de l'exploitation de l'énergie géothermique, ses avantages, la durabilité de son exploitation et son potentiel de développement.

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.developpement-durable.gouv.fr
- www.geothermie-soultz.fr
- www.planete-energies.com

MÉTIER Sélectionneur végétal

Employé par des instituts de recherche, de grandes entreprises semencières et parfois des associations, le sélectionneur est le métier clé dans l'élaboration de nouvelles variétés de plantes cultivées. S'il travaille en équipe avec des ingénieurs en biotechnologie et d'autres sélectionneurs, il est souvent sur le terrain au chevet des plantes pour les observer et choisir celles qui pourront se reproduire pour donner la prochaine génération. Pour ses choix, il doit tenir compte des multiples besoins, des agriculteurs, des consommateurs, des industriels. Il doit être un bon connaisseur de la biodiversité cultivée pour dénicher les caractères intéressants qui lui permettront de faire évoluer d'anciennes variétés.

ACTIVITÉS

1. Recherchez les questions que se pose le sélectionneur pour une espèce cultivée de votre choix.
2. Quelles sont les formations qui permettent de devenir sélectionneur végétal ?

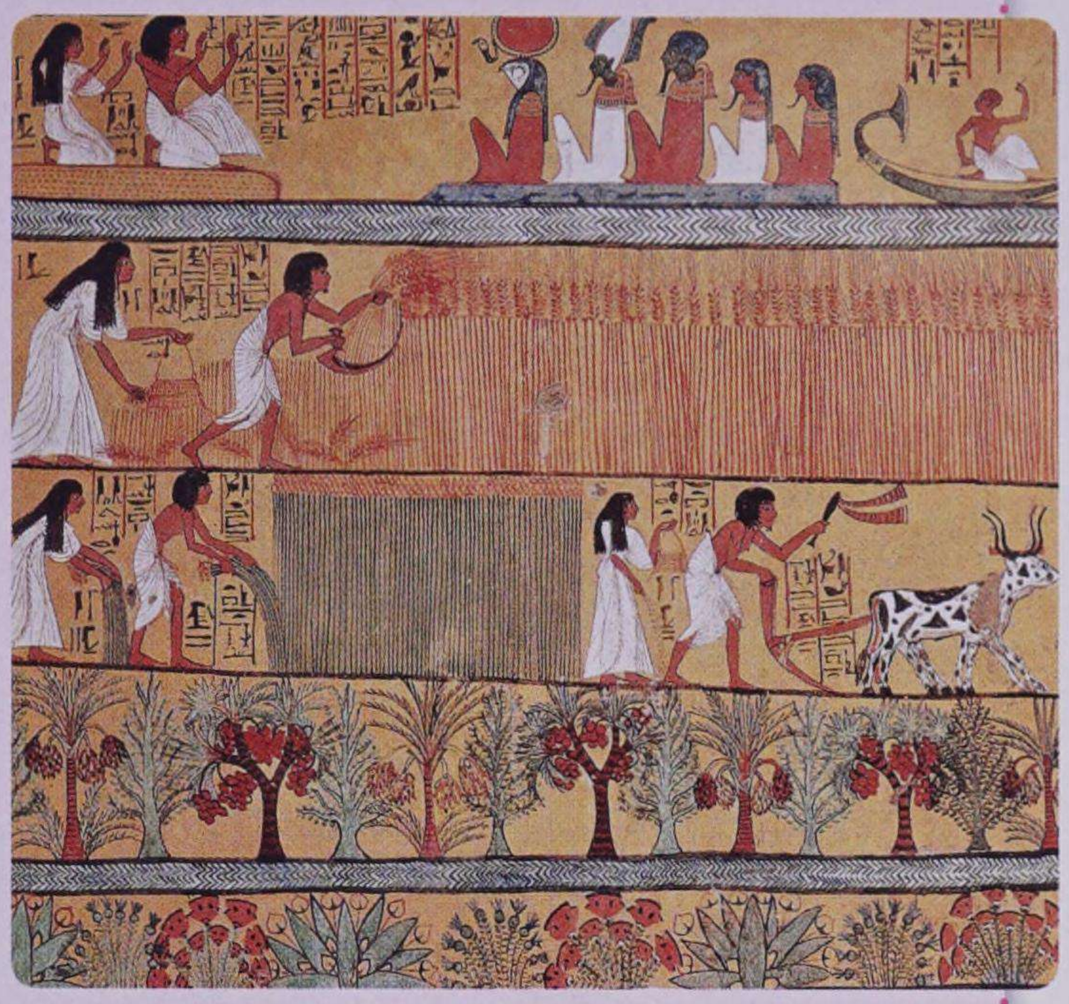
POUR EN SAVOIR PLUS onisep

- www.semencemag.fr (tapez « Métiers »)
- www.gnis-pedagogie.org/ (tapez « Vocation semencier »)
- www.onisep.fr

ART ET SCIENCE

L'agriculture dans l'art de l'Égypte antique

La tombe de Sennedjem à Deir el-Medineh (Égypte), découverte en 1886, est célèbre pour ses peintures murales représentant des travaux agricoles. On y voit Sennedjem et son épouse Yinerferti dans différentes situations. Ils vécurent il y a environ 3 300 ans sous le règne de Ramsès II.



Peinture murale dans la tombe de Sennedjem.

ACTIVITÉS

❶ Identifiez les différents travaux agricoles sur cette peinture.
❷ Que nous apprend ce document sur les pratiques agricoles et les espèces cultivées dans l'ancienne Égypte ?
❸ Cherchez des indices indiquant qu'il s'agit là d'une scène symbolique.

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.museum.agropolis.fr
- www.bubastis.be
- www.osirisnet.net

ENQUÊTE

Les conservatoires de ressources génétiques

Dès le XVIe siècle, de grandes collections naturalistes se mettent en place avec les premières descriptions scientifiques de la biodiversité. Les plantes mortes sont conservées dans des herbiers, tandis que les arboretum et jardins botaniques conservent des spécimens vivants.
Aujourd'hui, avec les préoccupations sur la biodiversité, il existe des conservatoires de ressources génétiques à toutes les échelles : certains stockent les graines de toutes les plantes connues (banques de semences), d'autres se sont spécialisés par espèce. Il existe également de nombreux conservatoires de ressources génétiques régionaux, généralement spécialisés dans la biodiversité des espèces domestiques animales et végétales locales. Toutes ces collections visent à préserver et conserver les ressources génétiques comme patrimoine commun de l'humanité.

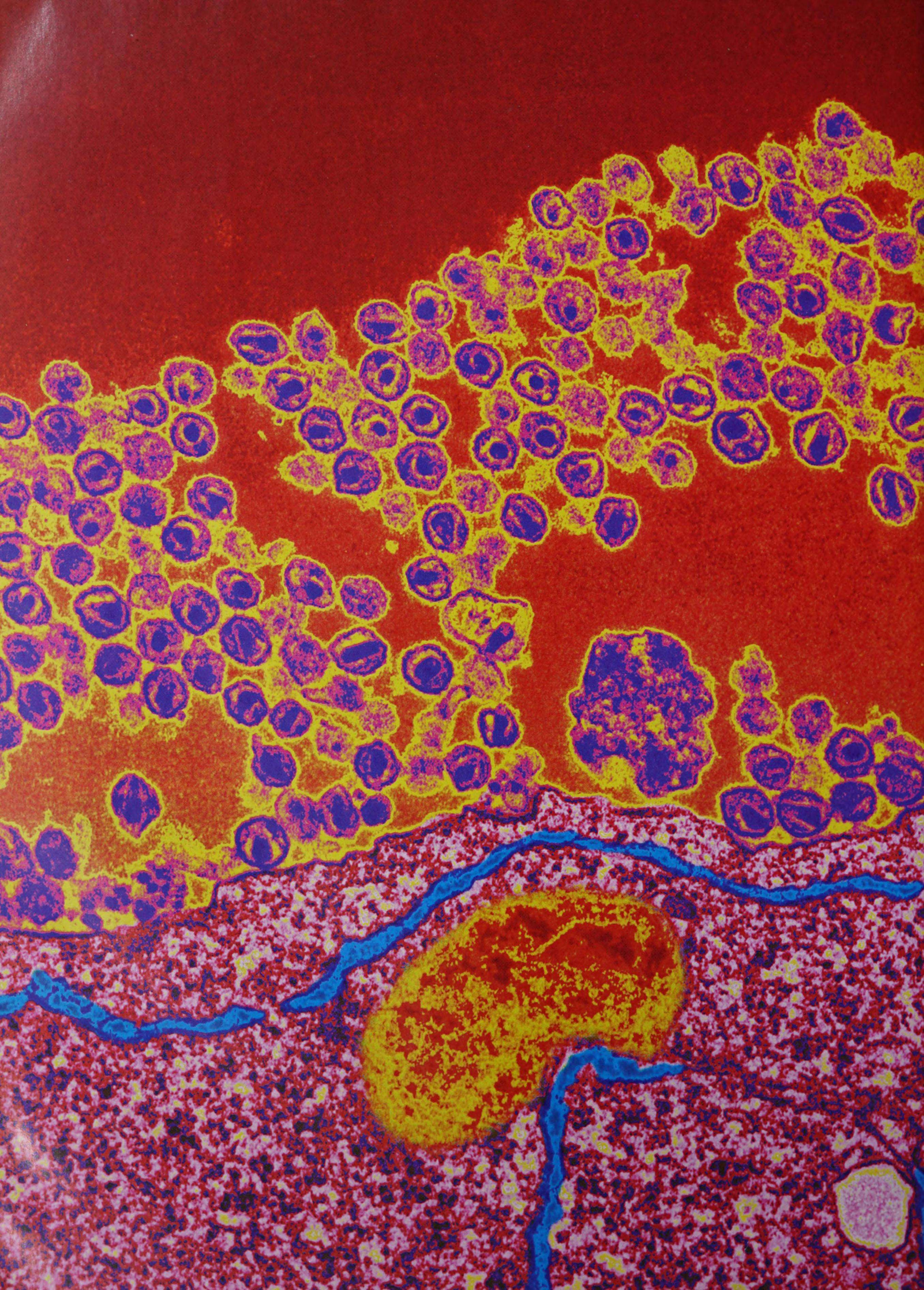
ACTIVITÉS

❶ Recherchez un centre de ressources génétiques proche de votre région et identifiez quelles sont leurs priorités et qui peut y avoir accès.
❷ Quelles sont les formes sous lesquelles sont conservés les espèces ? Comment procède-t-on pour les garder vivantes ?
❸ Recherchez un exemple de plante conservée. Montrez la diversité de l'espèce et expliquez la nécessité de la préserver.

POUR EN SAVOIR PLUS

Faites des recherches avec le mot clé « ressources génétiques » :

- www.inra.fr
- www.brg.prd.fr
- http://antilles-guyane.cirad.fr
- www.bioversityinternational.org



THÈME 5

Le maintien de l'intégrité de l'organisme

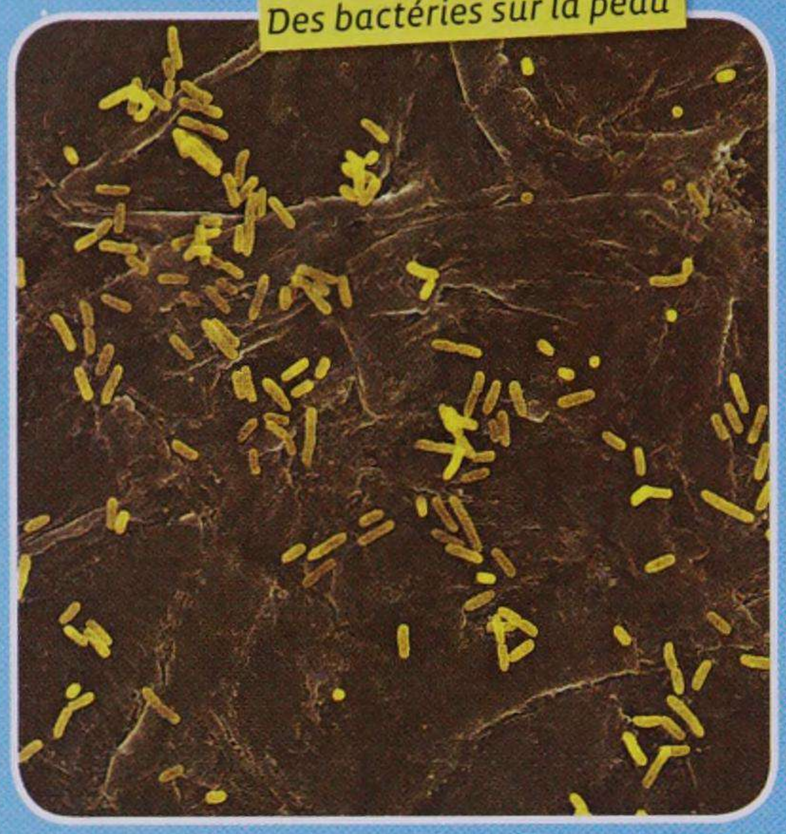
MOBILISER SES ACQUIS p. 264

1. La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée p. 267
2. L'immunité adaptative p. 283
3. Le phénotype immunitaire au cours de la vie p. 305

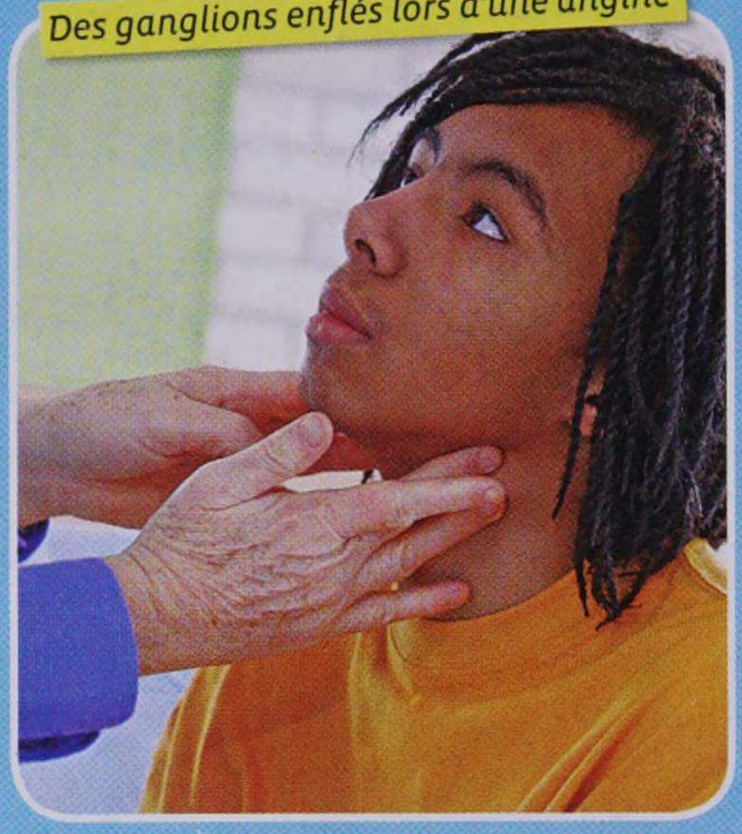
Virus du sida bourgeonnant à la surface d'un lymphocyte T (vue au MET, fausses couleurs).

1. Qu'est-ce que le système immunitaire ?

Des bactéries sur la peau



Des ganglions enflés lors d'une angine



Leucocytes dans une goutte de sang

1. Définissez ce qu'est un microbe.
2. Quels sont les rôles du système immunitaire ?
3. Comment le système immunitaire est-il organisé ?

mots clés

Leucocyte : globule blanc (il en existe de différents types, dont les lymphocytes B et T).
Ganglion lymphatique : organe du système immunitaire. Les ganglions sont répartis dans l'ensemble du corps.

2. Comment se déroule une réaction immunitaire ?

Chirurgien en cours d'opération

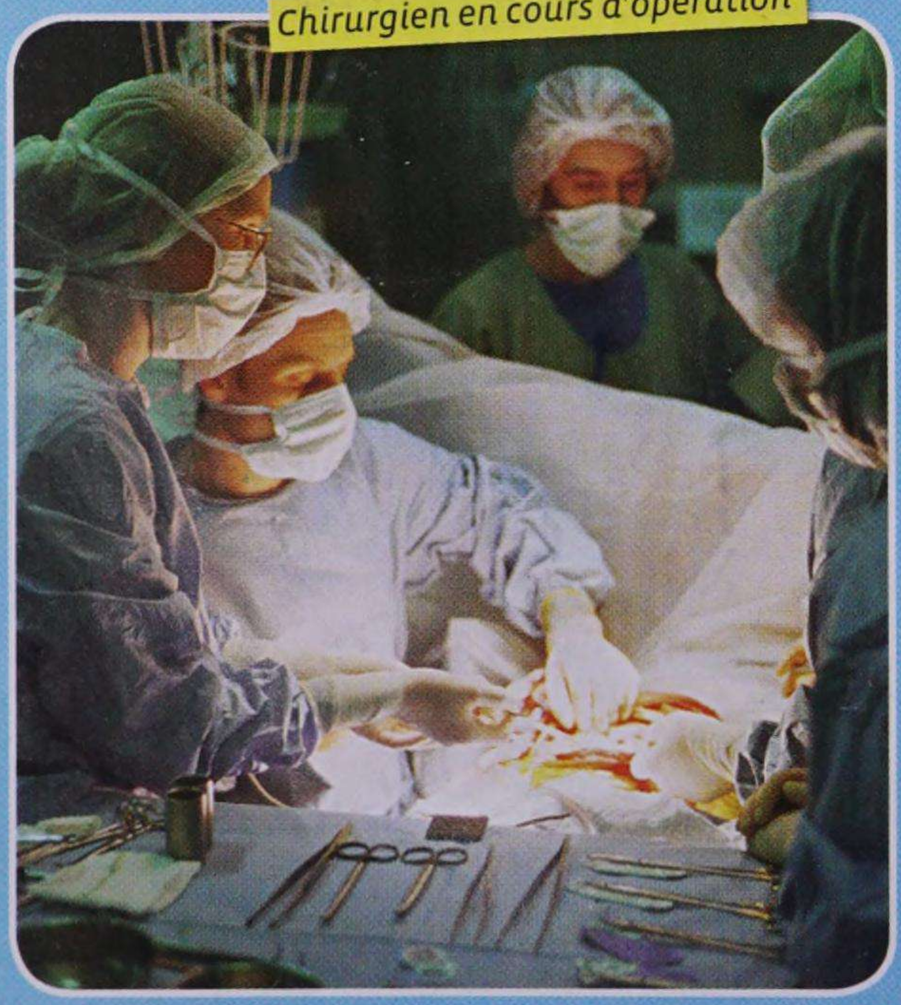
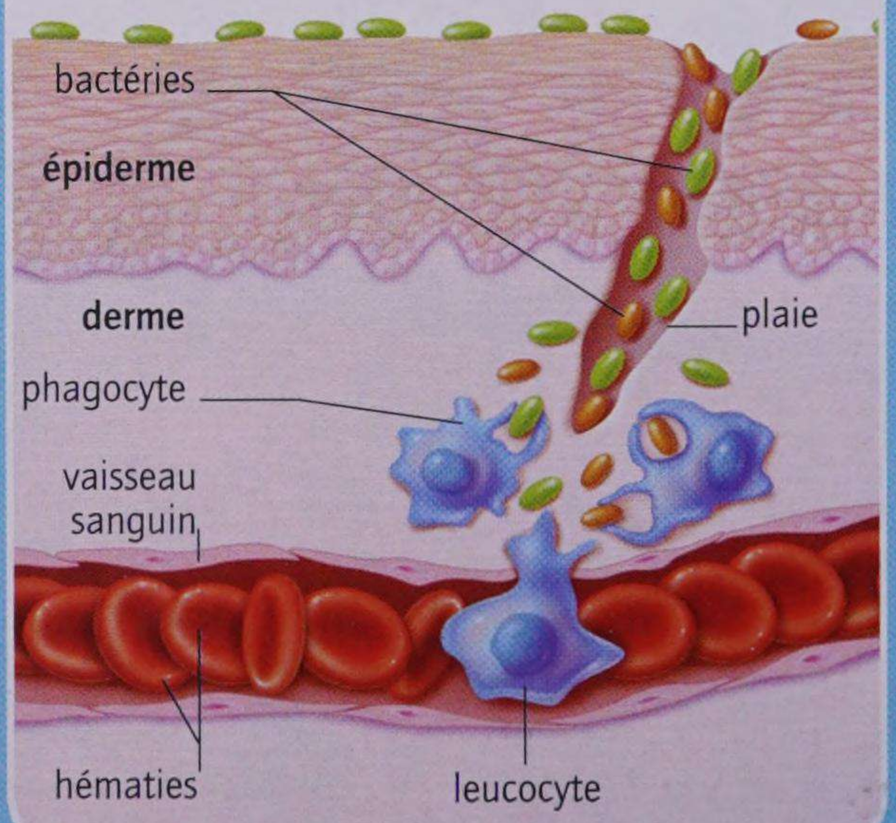


Schéma d'une plaie infectée



Test d'agglutination

1. Quels sont les 1ers signes d'une infection microbienne ?
2. Qu'est-ce que la réaction antigène-anticorps ?

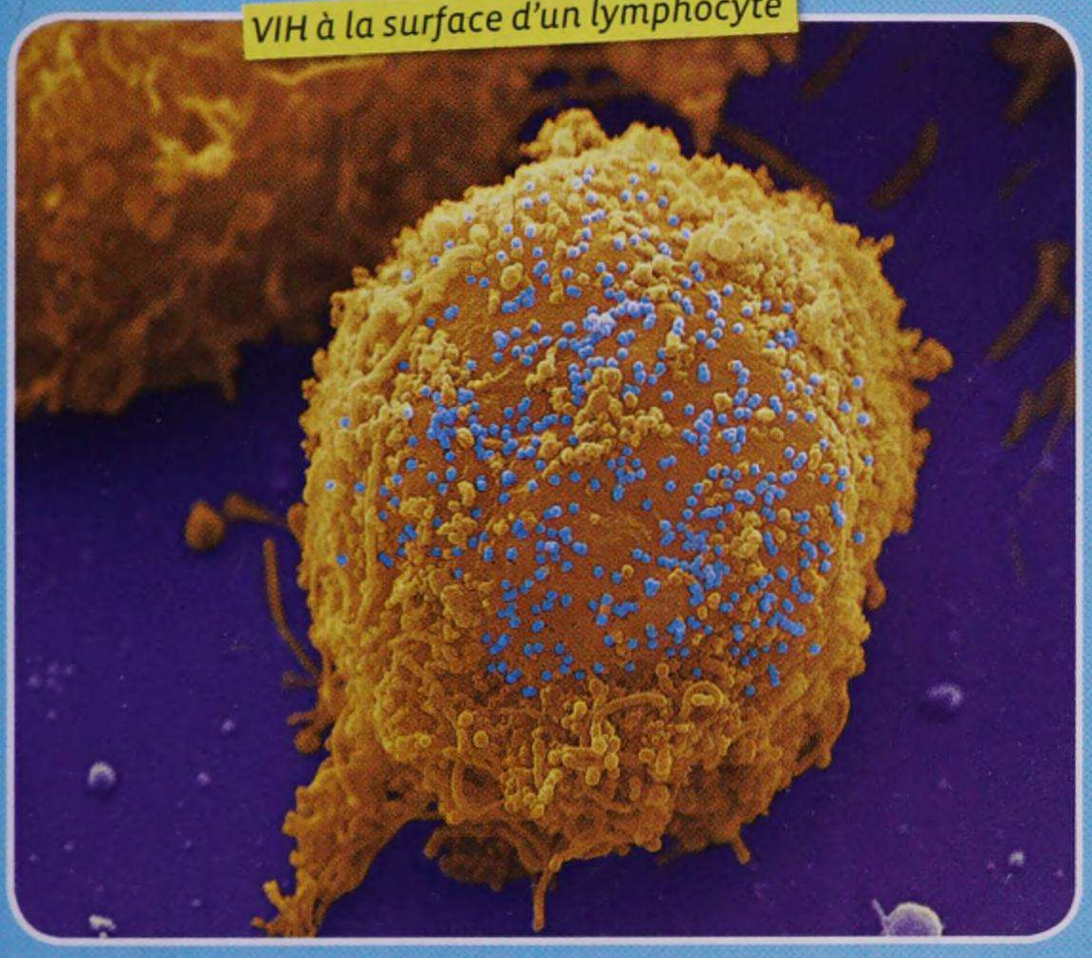
Anticorps : molécule produite par les lymphocytes B, pouvant se lier spécifiquement à un antigène.
Antigène : molécule étrangère à l'organisme, capable de déclencher une réaction immunitaire.
Infection : développement des microorganismes dans l'organisme.

3. Comment lutter contre les maladies infectieuses ?

Un antibiogramme

Jenner en 1776 et les débuts de la vaccination

VIH à la surface d'un lymphocyte



1. **Retrouvez les différentes méthodes de lutte contre les microorganismes.**
2. **Quel est le principe de la vaccination ?**
3. **Qu'est-ce que le sida ?**

Antibiotique : molécule médicamenteuse qui empêche le développement de certaines bactéries.
Séropositivité : présence dans le sang d'un anticorps spécifique d'un antigène.
Sida : syndrome de l'immunodéficience acquise dû au VIH (virus de l'immunodéficience humaine).

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 5

Les microbes sont des **micro-organismes** (bactéries, virus...) omniprésents dans l'environnement. Certains étant capables de déclencher des maladies, l'organisme doit pouvoir lutter contre eux : c'est le rôle fondamental du **système immunitaire**. Pour cela, il dispose d'organes (**ganglions lymphatiques**...), de cellules (**leucocytes**...) et de molécules (**anticorps**...) qui interviennent de manière précise et coordonnée.

Une fois les barrières naturelles de l'organisme franchies par les microorganismes (contamination), ils peuvent s'y multiplier : c'est l'**infection**. Des réactions de défense rapides se mettent en place localement. Mais si elles ne suffisent pas pour stopper le développement microbien, d'autres mécanismes immunitaires se déclenchent, où interviennent des **lymphocytes** et des **anticorps**, molécules spécifiques de l'**antigène** en cause.

Pour lutter contre une infection microbienne, on dispose de moyens préventifs empêchant la contamination (**asepsie**) ou préparant l'organisme à reconnaître et à lutter contre un antigène précis (**vaccination**). Une fois l'infection installée, des médicaments (**antibiotiques** contre les bactéries) aident l'organisme à éliminer les microbes. Dans le cas du **sida**, le système immunitaire des individus **séropositifs** est progressivement détruit par le VIH, permettant ainsi le développement de maladies opportunistes.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée 267

UNITÉ 1 Les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë 268
UNITÉ 2 L'initiation de la réaction inflammatoire aiguë 270
UNITÉ 3 L'action des médiateurs chimiques de l'inflammation 272
UNITÉ 4 L'issue de la réaction inflammatoire aiguë 274
Bilan des unités 276
L'essentiel 278
Exercices 280

CHAPITRE 2 L'immunité adaptative 283

UNITÉ 1 La réponse adaptative humorale 284
UNITÉ 2 Le mode d'action des anticorps 286
UNITÉ 3 La réponse adaptative cellulaire 288
UNITÉ 4 L'origine des anticorps 290
UNITÉ 5 La maturation du système immunitaire 292
UNITÉ 6 VIH et sida 294
Bilan des unités 296
L'essentiel 300
Exercices 302

CHAPITRE 3 Le phénotype immunitaire au cours de la vie 305

UNITÉ 1 La mémoire immunitaire 306
UNITÉ 2 La vaccination 308
UNITÉ 3 L'évolution du phénotype immunitaire 310
Bilan des unités 312
L'essentiel 314
Exercices 316
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 318
ATELIERS D'EXPLORATION ENQUÊTE – HISTOIRE DES SCIENCES – SCIENCES ACTUALITÉS – MÉTIER 320

CHAPITRE 1

La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée

Lorsqu'un agent infectieux (bactérie, virus, champignon microscopique, etc.) pénètre dans l'organisme et commence à s'y multiplier, on observe la mise en route très rapide d'un ensemble de réactions immunitaires qui constituent l'immunité innée. La réaction inflammatoire aiguë est un des mécanismes essentiels de l'immunité innée.

Un macrophage (en jaune) phagocytant des bactéries (en bleu). Cliché au MEB, fausses couleurs (x 5000).

Comment la réaction inflammatoire aiguë permet-elle à l'organisme de lutter contre les agents infectieux ?

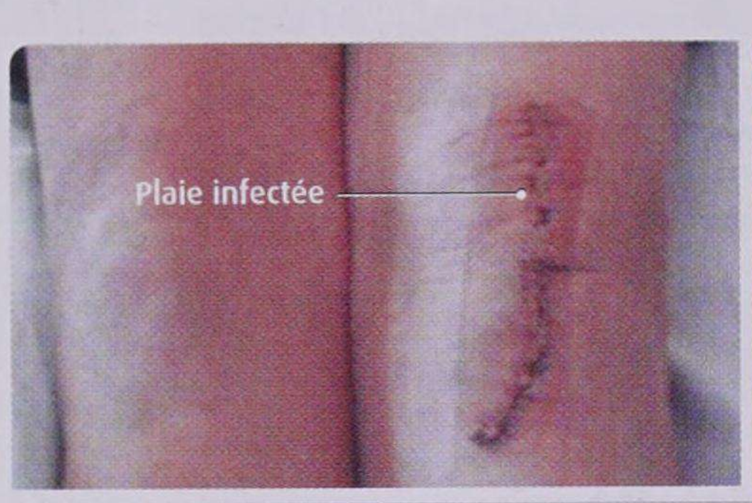
UNITÉ 1

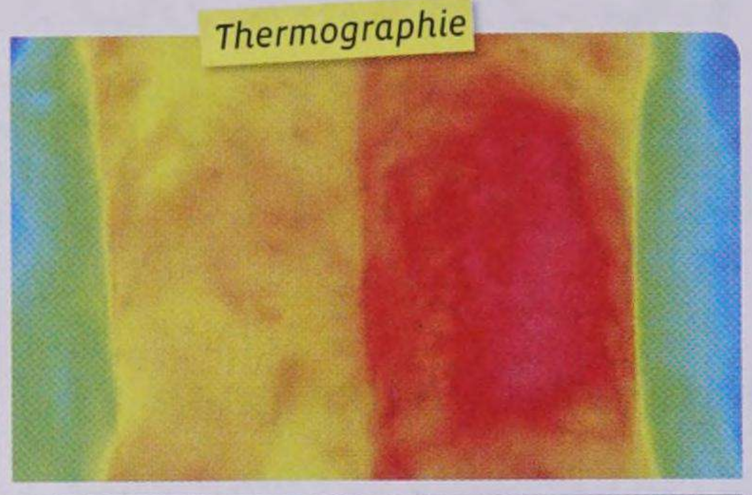
Les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë

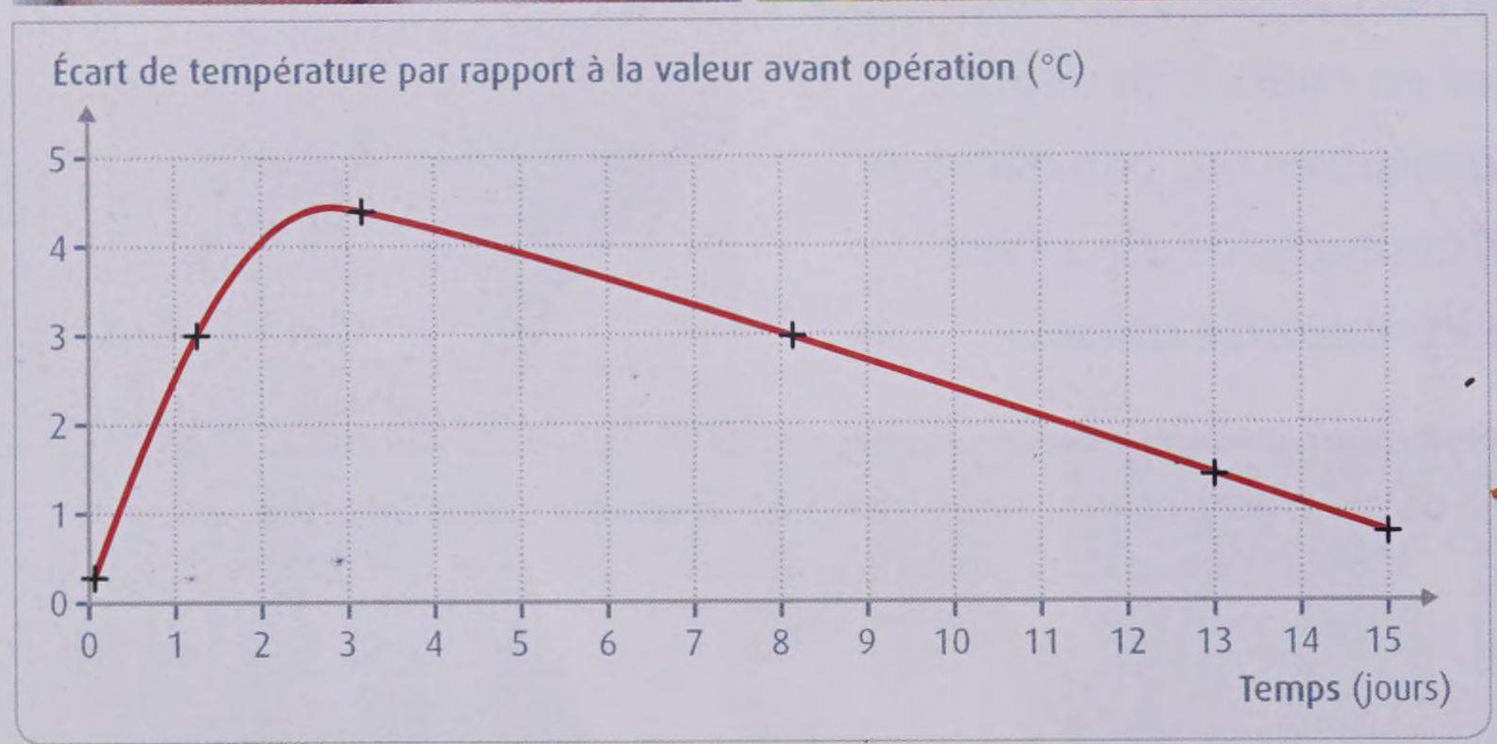
L'immunité innée est la première ligne de défense de l'organisme face aux agents infectieux. La réaction inflammatoire aiguë est un des mécanismes essentiels de l'immunité innée.

Quelles sont les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë ?

Les caractéristiques à l'échelle de l'organisme



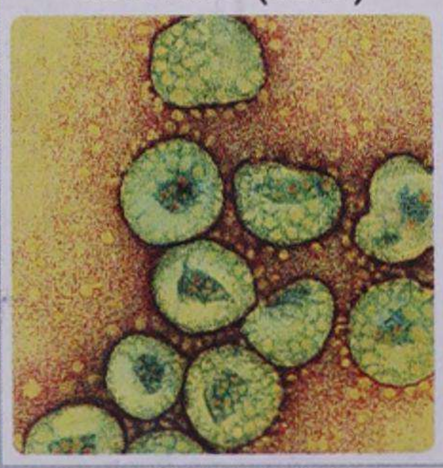
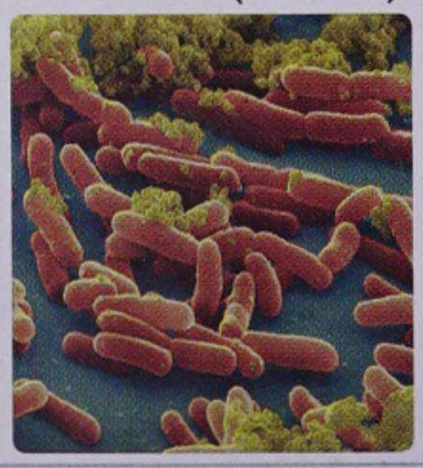
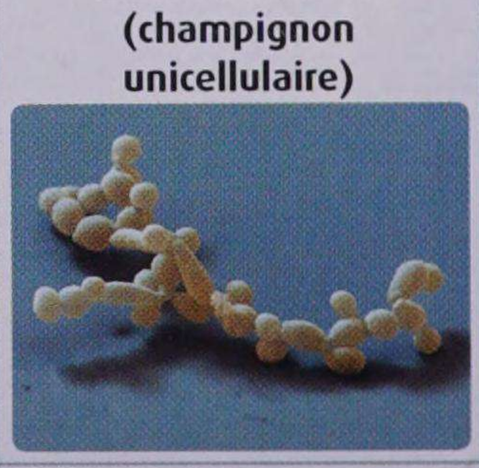
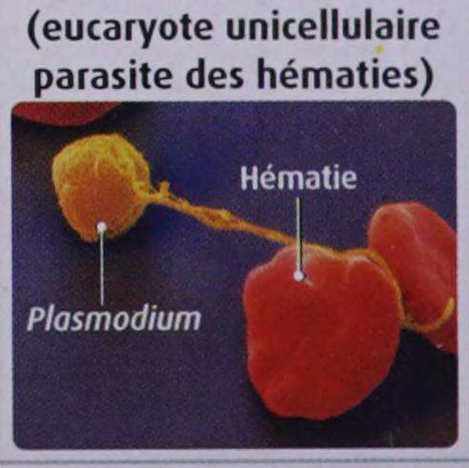




1 Une plaie cutanée. Le cliché est réalisé environ 24 heures après une lésion à l'origine d'une infection bactérienne. La plaie est douloureuse et gonflée.

2 Évolution de la température au niveau d'une plaie infectée à la suite d'une opération chirurgicale. L'infection est liée à la prolifération de bactéries.

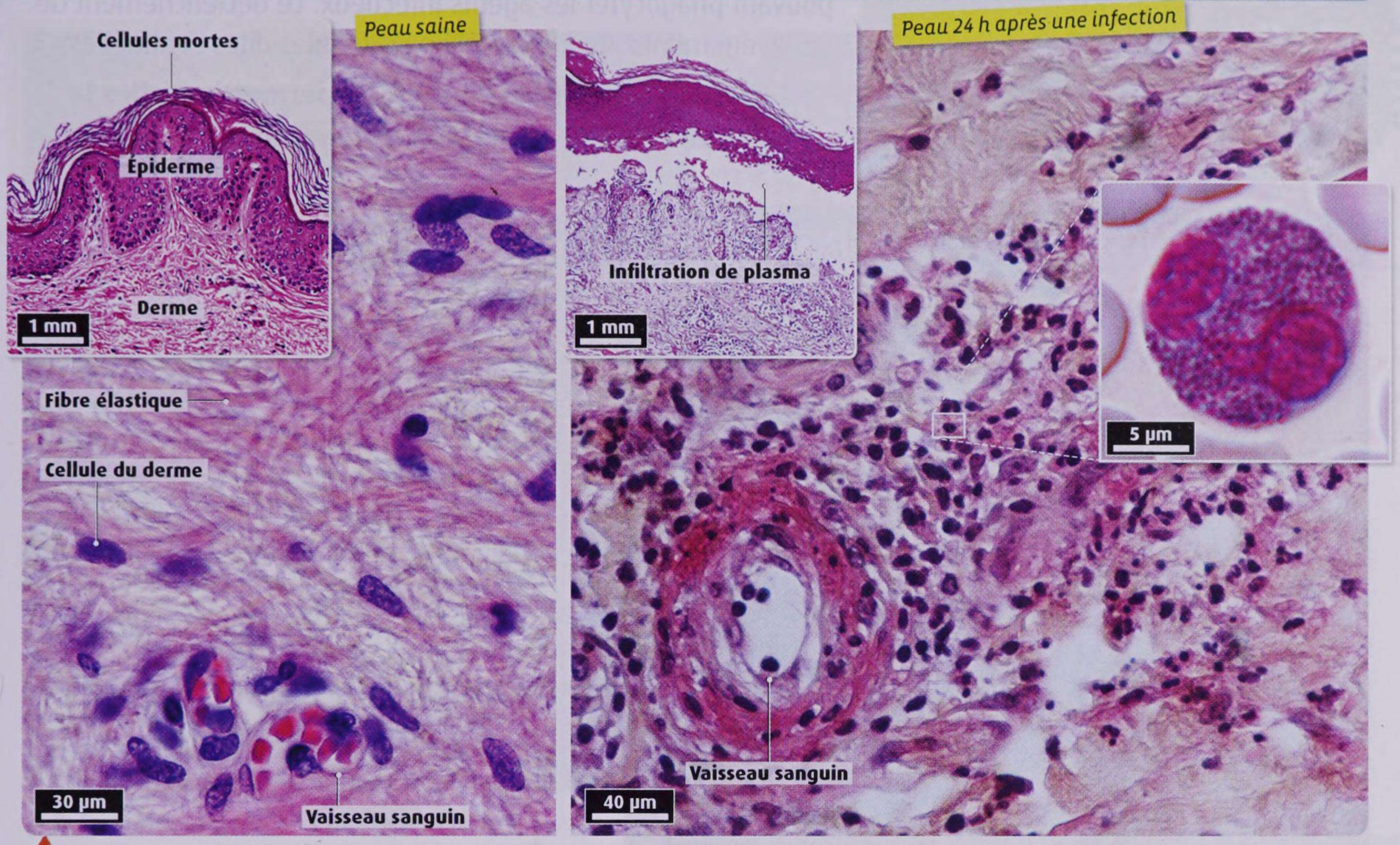
Lors d'infections par une grande variété de microorganismes, on observe, le plus souvent en moins de 24 heures, la mise en route d'une réaction inflammatoire aiguë. La présence d'une lésion tissulaire (brûlure, dommage provoqué par un produit chimique, etc.) déclenche également une réaction inflammatoire aiguë. Cette réaction se manifeste toujours de la même façon que l'organisme ait ou non déjà rencontré l'agent infectieux et quel que soit l'âge de l'individu (elle est observée dès la naissance).

Agent infectieux	*Influenza* (virus)	*Salmonella* (bactérie)	*Candida albicans* (champignon unicellulaire)	*Plasmodium falciparum* (eucaryote unicellulaire parasite des hématies)
				
Site de pénétration	Voies aériennes	Tube digestif par ingestion	Voies génitales, voies digestives, peau	Peau (piqûres d'insectes)
Pathologie associée	Grippe	Salmonellose (troubles digestifs)	Candidose (lésions de la peau)	Paludisme

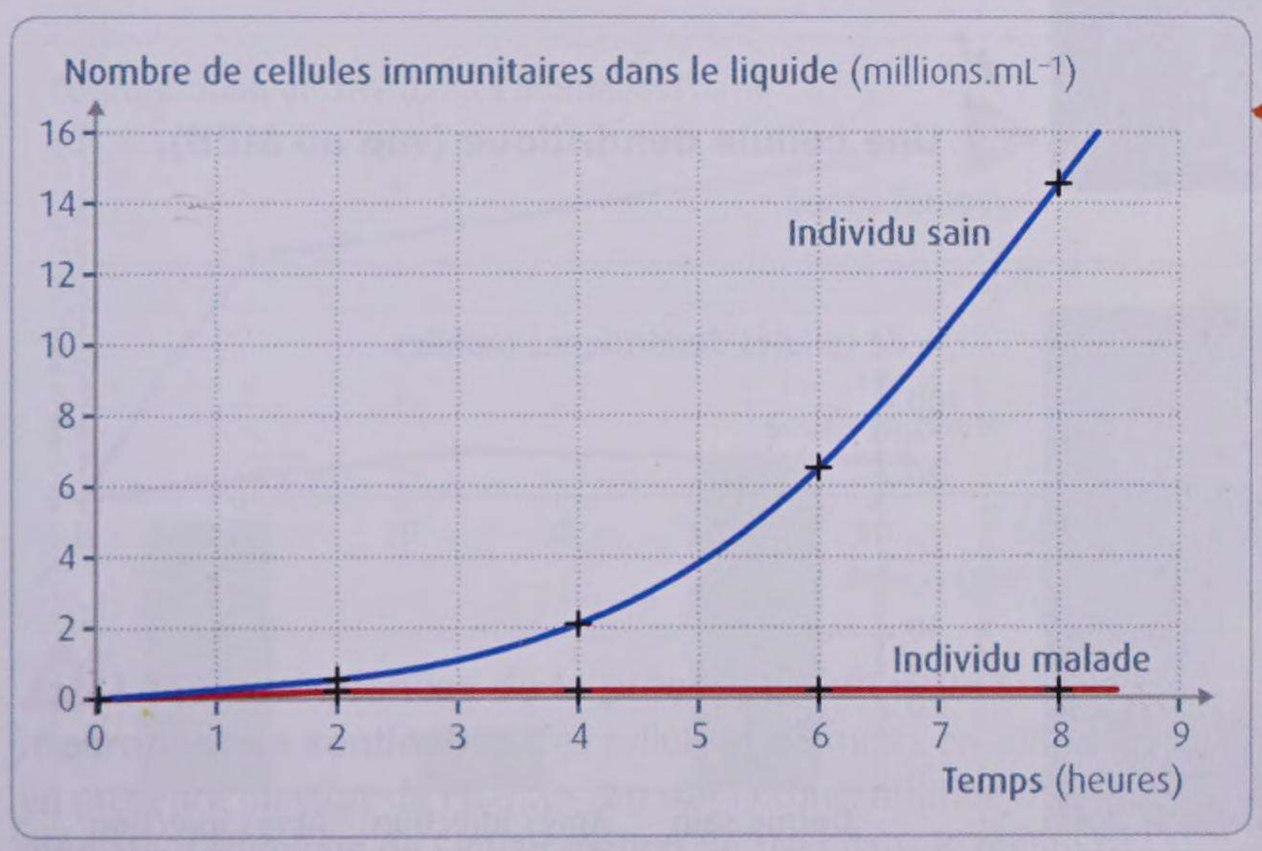
Quelques agents infectieux à l'origine d'une réaction inflammatoire aiguë.

3 Les conditions du déclenchement de la réaction inflammatoire aiguë.

Les caractéristiques à l'échelle du tissu



4 Coupe transversale et vue rapprochée du derme dans une peau saine et dans une peau infectée (vues au MO). Le derme est un tissu constitué de cellules éparpillées au sein de fibres protéiques assurant l'élasticité et la résistance de la peau.



5 Des données expérimentales. Chez un nouveau-né souffrant d'infections à répétition, on abrase une petite portion de l'épiderme du bras. Cette action déclenche normalement une réaction inflammatoire aiguë. On prélève régulièrement le liquide qui afflue sur la zone abrasée et les cellules qui s'y trouvent sont dénombrées. Des observations au microscope montrent que ces cellules sont des granulocytes et des monocytes (**voir la fiche « cellules immunitaires »** sur le rabat de couverture). Les résultats sont comparés avec ceux d'un nourrisson en bonne santé. D'autres analyses montrent que l'enfant malade présente une mutation sur les deux allèles d'un gène codant une protéine exprimée par les monocytes et les granulocytes.

ACTIVITÉS

1. **DOC. 1 À 3.** Caractérisez les symptômes et les conditions de déclenchement de la réaction inflammatoire aiguë.
2. **DOC. 4 ET 5.** Par l'analyse des documents et à l'aide de la fiche « cellules immunitaires », indiquez quels arguments plaident en faveur d'une migration de cellules en provenance du compartiment sanguin sur le site infecté.
3. **DOC. 4 ET 5.** À l'aide de la fiche « cellules immunitaires », indiquez pourquoi cette migration cellulaire permet de lutter contre l'infection.
4. **DOC. 5.** Montrez que la réaction inflammatoire aiguë est génétiquement héritée.
5. **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë.

UNITÉ 2

L'initiation de la réaction inflammatoire aiguë

La réaction inflammatoire aiguë se caractérise par un afflux, sur le site infecté, de plasma sanguin et de cellules immunitaires pouvant phagocyter les agents infectieux. Le déclenchement de ces événements implique l'action de cellules dites sentinelles.

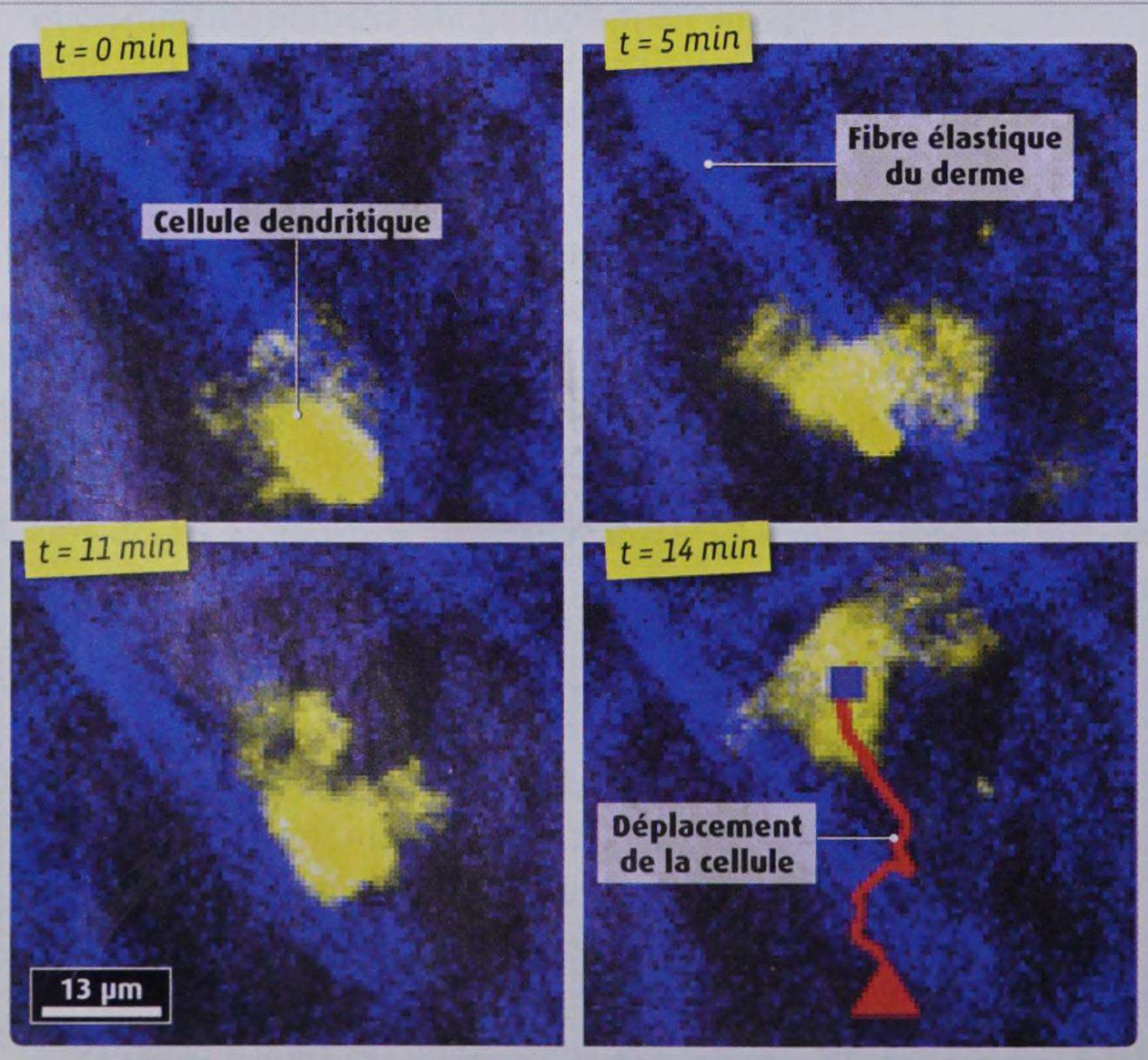
Comment des cellules sentinelles permettent-elles la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë ?

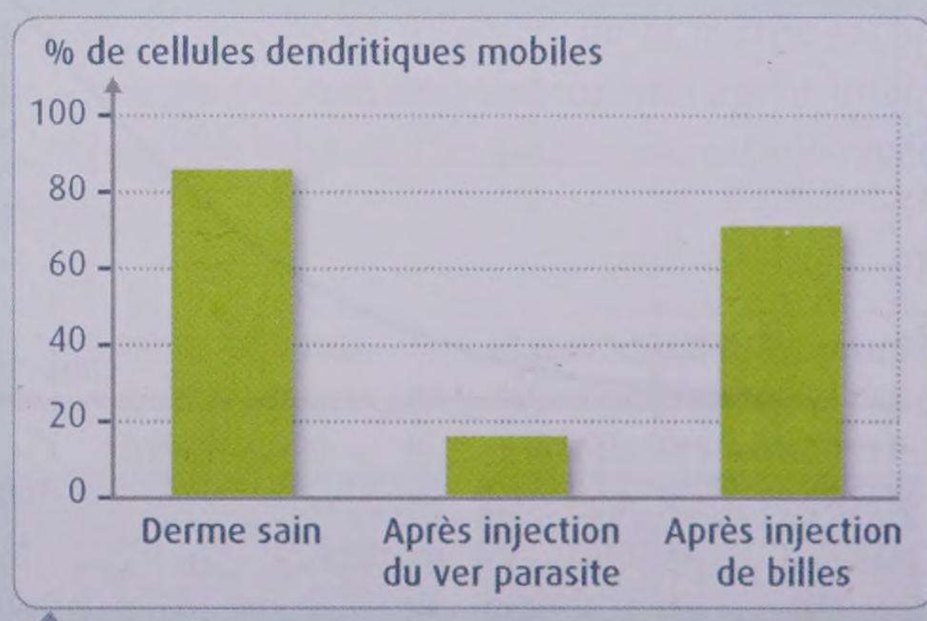
Le comportement des cellules sentinelles

Les cellules sentinelles sont des cellules immunitaires qui résident en permanence dans les tissus, même lorsque ces derniers ne sont pas lésés ou infectés. Les cellules dendritiques (voir ci-contre), présentes au niveau de la peau et des muqueuses de l'appareil respiratoire, digestif ou génital, sont des cellules sentinelles typiques. Elles possèdent de longs prolongements cytoplasmiques très mobiles qui évoquent les dendrites des cellules nerveuses. Les mastocytes (voir doc. 4) et certains macrophages (présents par exemple dans les alvéoles pulmonaires) sont d'autres exemples de cellules sentinelles.

1 Les cellules sentinelles.

2 Une cellule dendritique (vue au MEB).





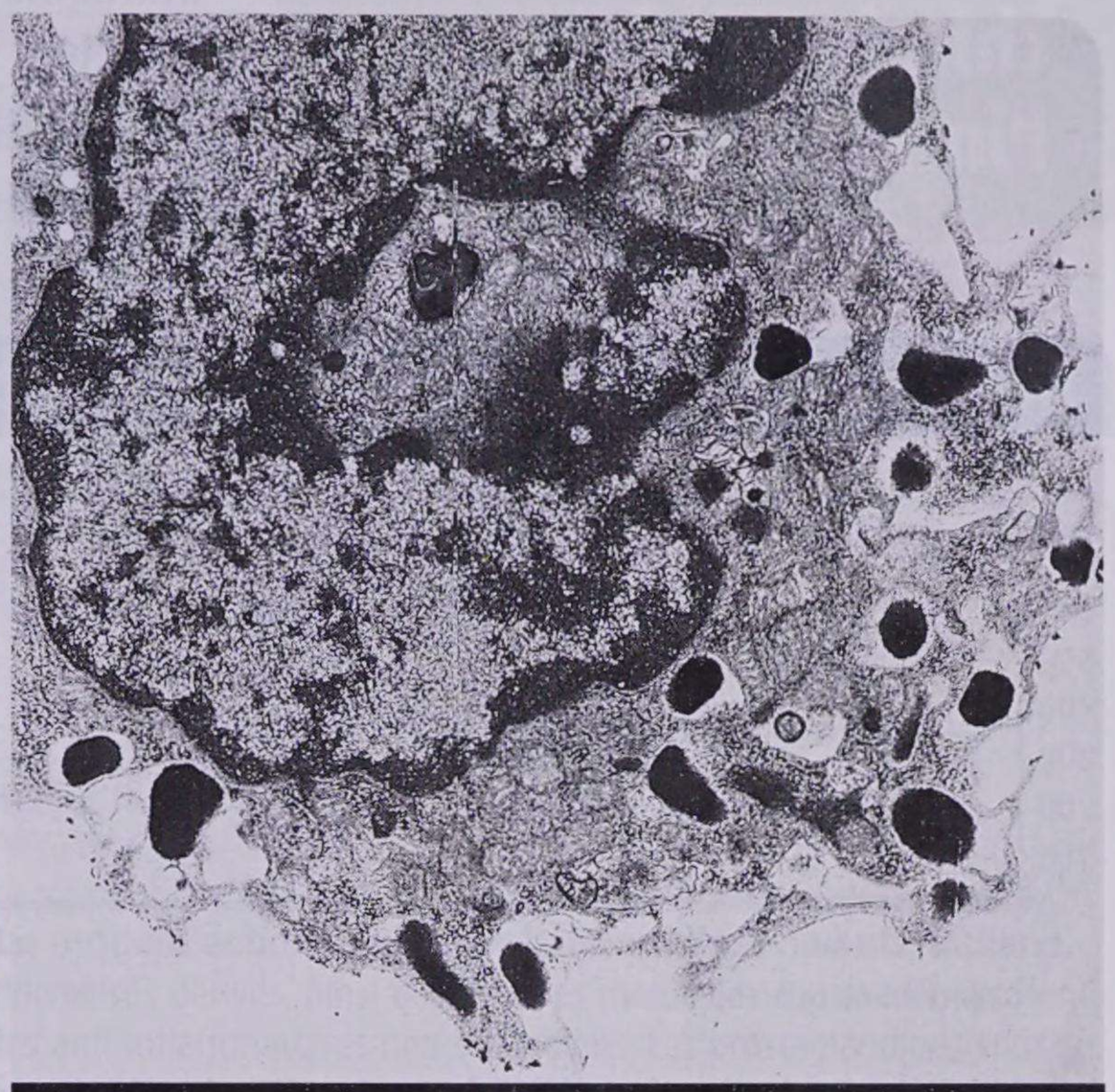
Proportion de cellules dendritiques mobiles dans un derme sain ou dans un derme après injection soit de billes en plastique, soit d'un ver parasite.

Suivi en temps réel du comportement d'une cellule dendritique dans la peau de l'oreille d'une souris non infectée (observations au MO).

3 Une étude du comportement des cellules dendritiques dans un derme sain ou infecté.

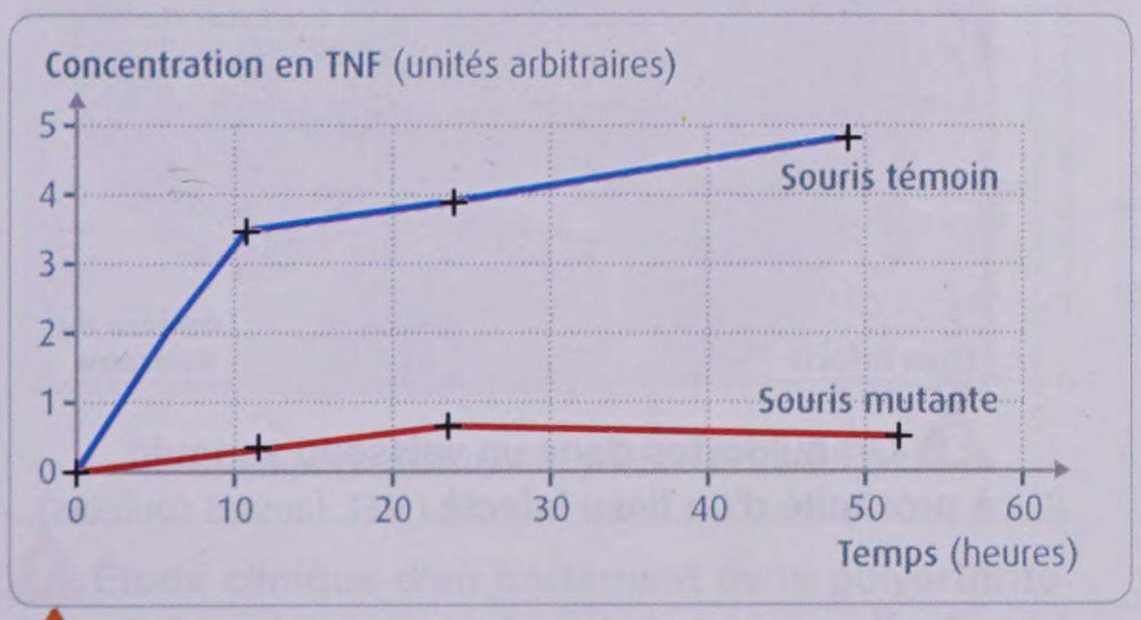
Le mode d'action des cellules sentinelles

Mastocyte au repos :
- Libération d'histamine = 1 (référence)
- Concentration de TNF dans le milieu = 50 pg.mL^{-1}



Mastocyte après contact avec des bactéries :
- Libération d'histamine = 5,6
- Concentration de TNF dans le milieu = 1950 pg.mL^{-1}

4 Des mastocytes en culture (vus au MET, fausses couleurs) Les granules cytoplasmiques des mastocytes sont riches en de nombreux médiateurs chimiques de l'inflammation tels que le TNF et l'histamine.



5 Les conséquences de la présence d'un virus sur des macrophages sentinelles. Ces cellules sont mises en culture en présence du virus de l'herpès. On suit la concentration d'un médiateur chimique de l'inflammation (le TNF) dans le milieu de culture chez une souris témoin et chez une souris mutante dont un récepteur de l'immunité innée (voir doc. 6) est inactivé.

Vocabulaire

Médiateur chimique de l'inflammation : molécule sécrétée par les cellules immunitaires contribuant à la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë. On en a identifié plusieurs dizaines. Souvent, un même médiateur peut être sécrété par différents types cellulaires et avoir plusieurs actions biologiques.

Les cellules sentinelles expriment sur leur membrane plasmique une dizaine de récepteurs dits de l'immunité innée. Ces récepteurs reconnaissent des composants universels de la paroi ou de la membrane plasmique des bactéries et des champignons unicellulaires, des déchets produits par des parasites eucaryotes, des protéines d'enveloppe des virus, des molécules libérées par les cellules de l'organisme en cas de lésion, etc. Grâce à ces récepteurs, les cellules sentinelles sont capables de détecter la plupart des agents infectieux ou des situations potentiellement dangereuses pour l'organisme.

6 Les récepteurs de l'immunité innée.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À l'aide des documents proposés, expliquez les mécanismes permettant la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë dans une grande variété de situations.

Pour cela vous pouvez :
- caractériser les cellules immunitaires sentinelles et justifier ainsi leur appellation **(DOC. 1 À 3)**.
- déterminer les conséquences de la présence d'agents infectieux sur l'activité de sécrétion des cellules sentinelles et proposer une explication sur l'origine de cette activité **(DOC. 4 À 6)**.

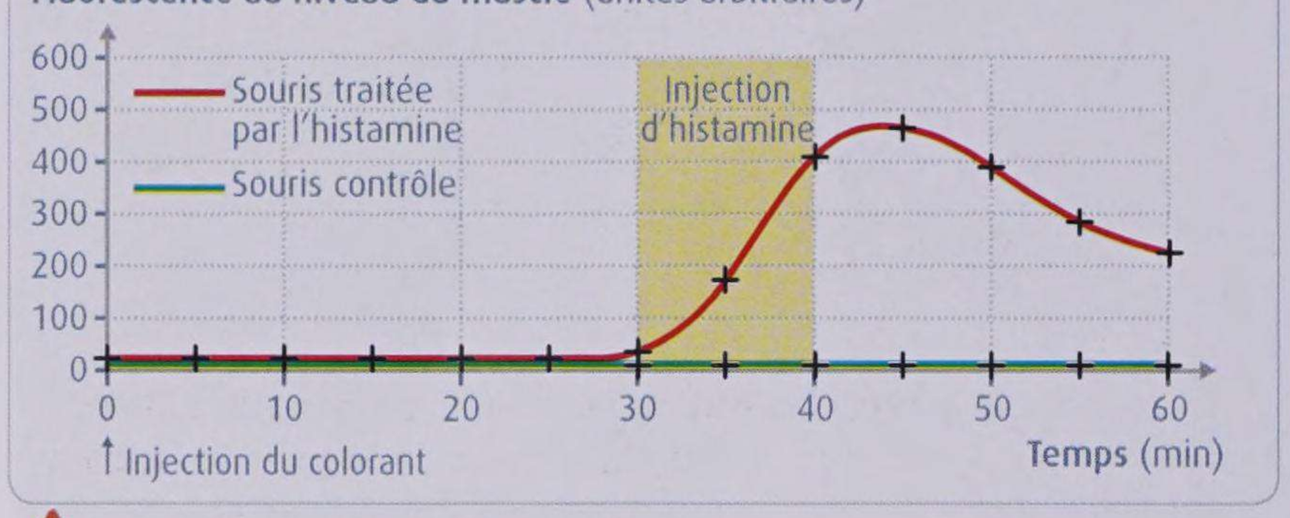
UNITÉ 3

L'action des médiateurs chimiques de l'inflammation

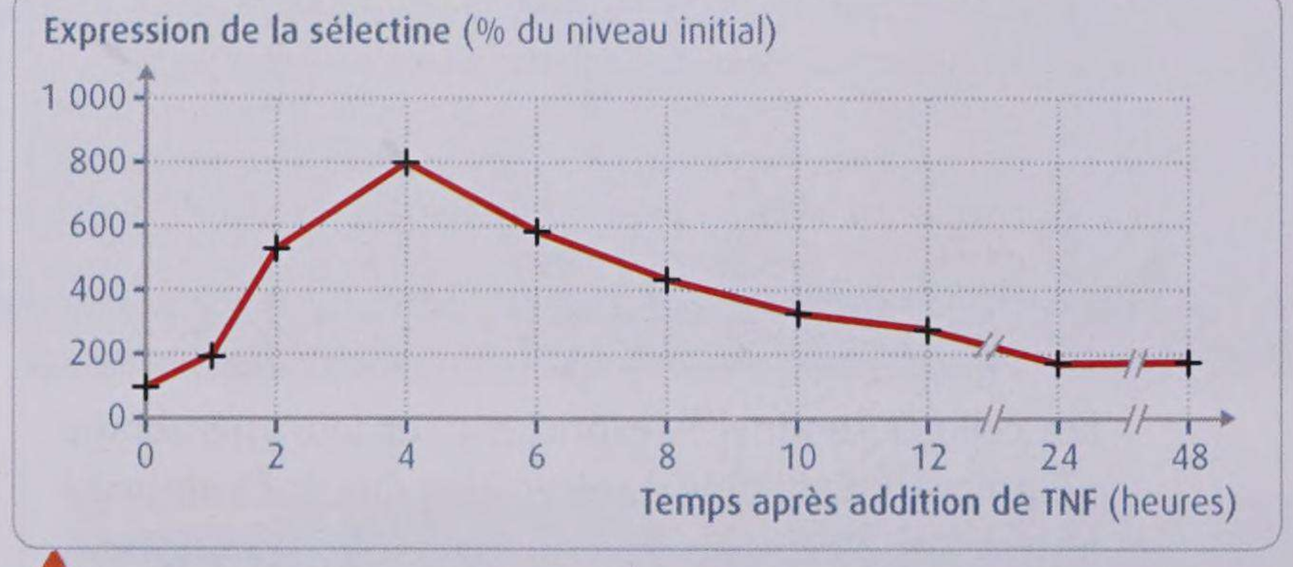
La réaction inflammatoire aiguë est initiée par la reconnaissance d'un agent infectieux par des cellules immunitaires sentinelles. Suite à ce contact, ces cellules sécrètent des médiateurs chimiques de l'inflammation.

Quelle est l'action des médiateurs chimiques de l'inflammation ?

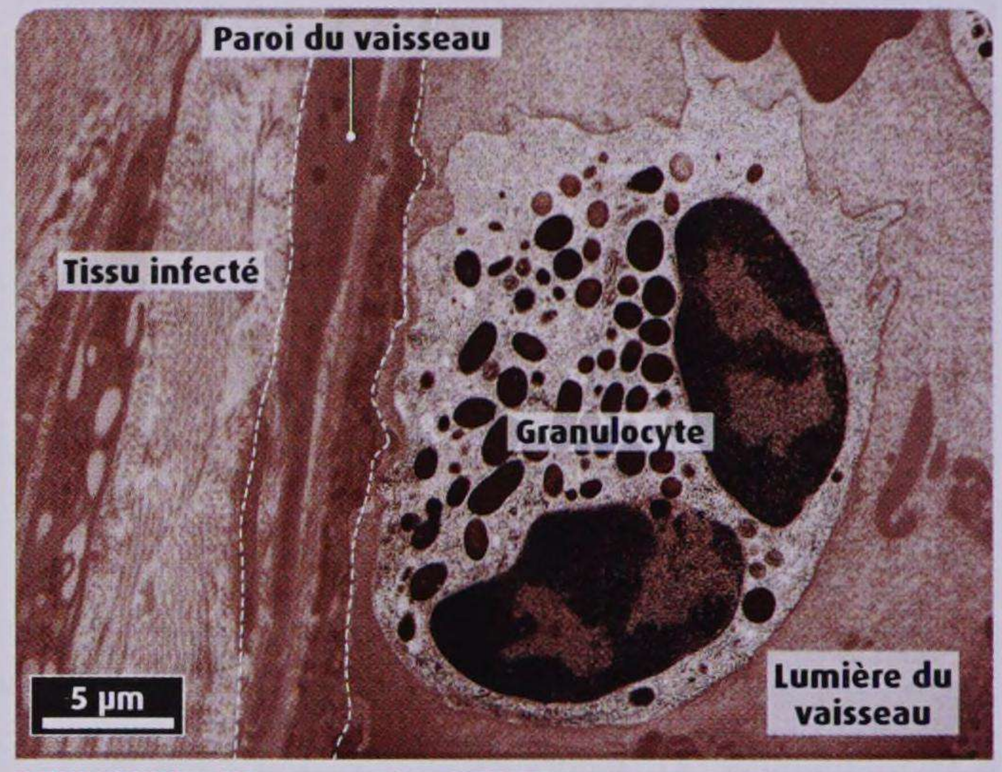
Deux exemples de médiateurs chimiques de l'inflammation

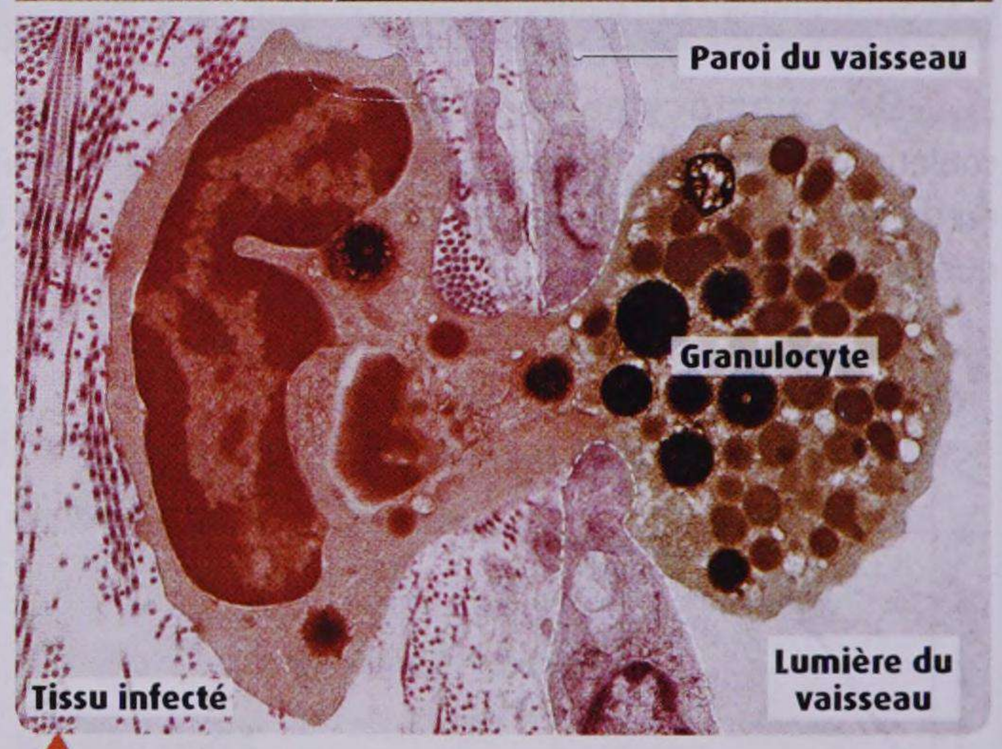


1 Une étude de l'action de l'histamine. Un colorant fluorescent est injecté dans la circulation sanguine d'une souris. On applique ensuite de l'histamine dans l'un de ses muscles puis on suit la fluorescence dans les tissus proches des vaisseaux sanguins irrigant le muscle traité.

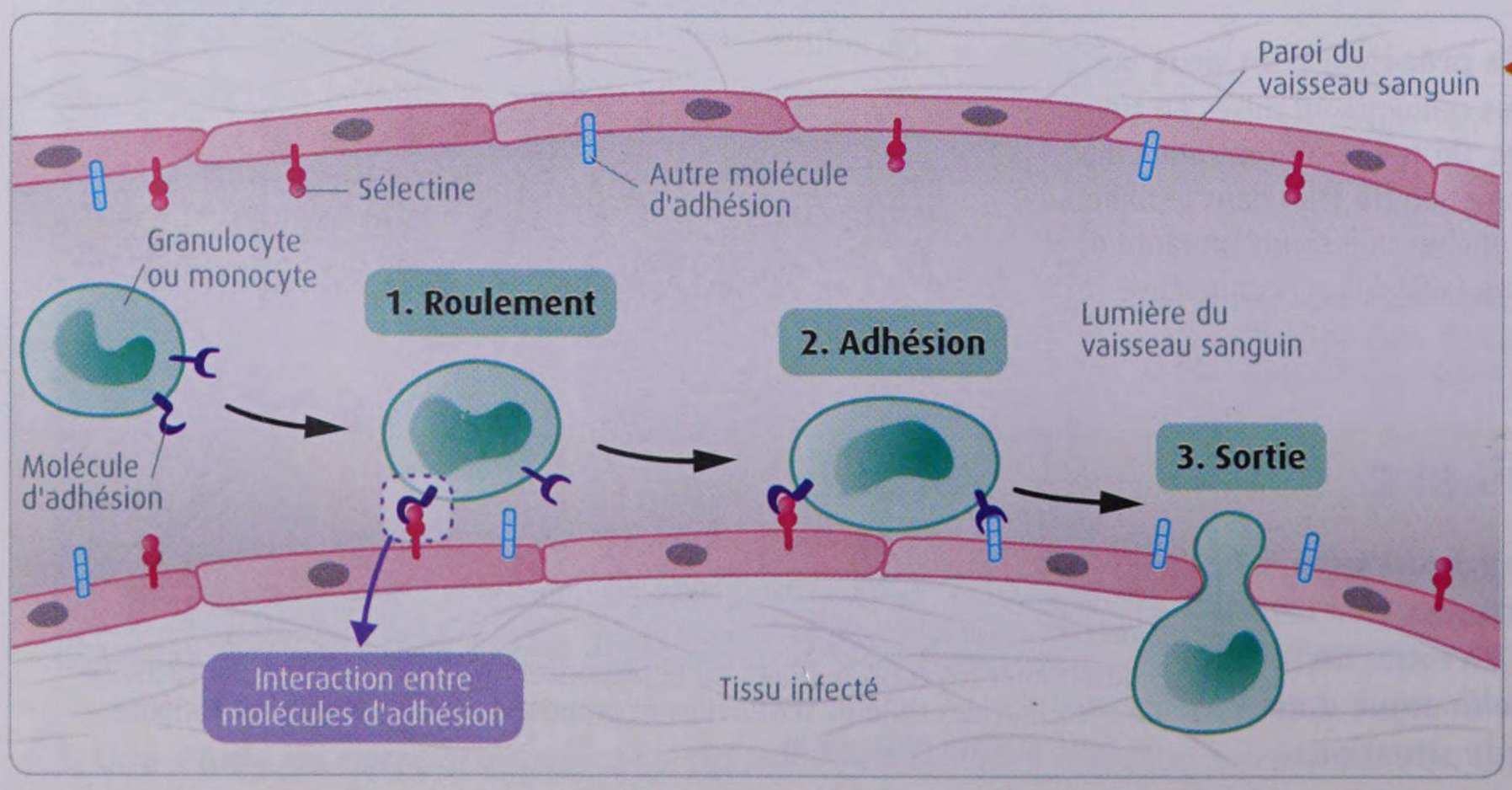


3 Expression de la sélectine par des cellules de paroi interne de vaisseaux sanguins en réponse à l'injection de TNF. La sélectine est une molécule dite d'adhésion (voir ci-dessous).





2 Granulocytes dans un vaisseau sanguin à proximité d'un tissu infecté (MET, fausses couleurs).



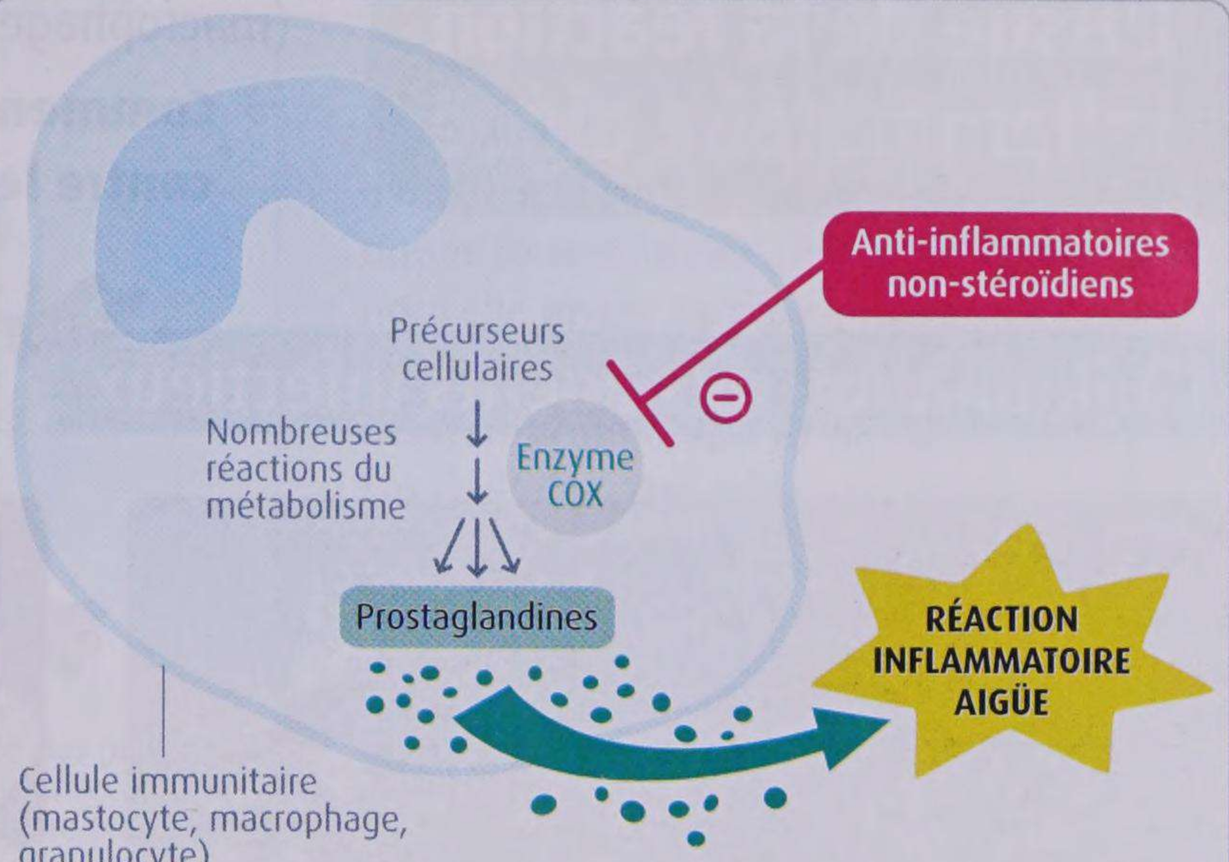
4 Le rôle des molécules d'adhésion dans la migration des granulocytes et monocytes sanguins vers un tissu infecté. Les molécules d'adhésion jouent un rôle clé dans le contrôle des mouvements cellulaires. Elles se lient à d'autres molécules d'adhésion présentes soit sur d'autres cellules, soit dans le milieu extracellulaire.

Les médicaments anti-inflammatoires

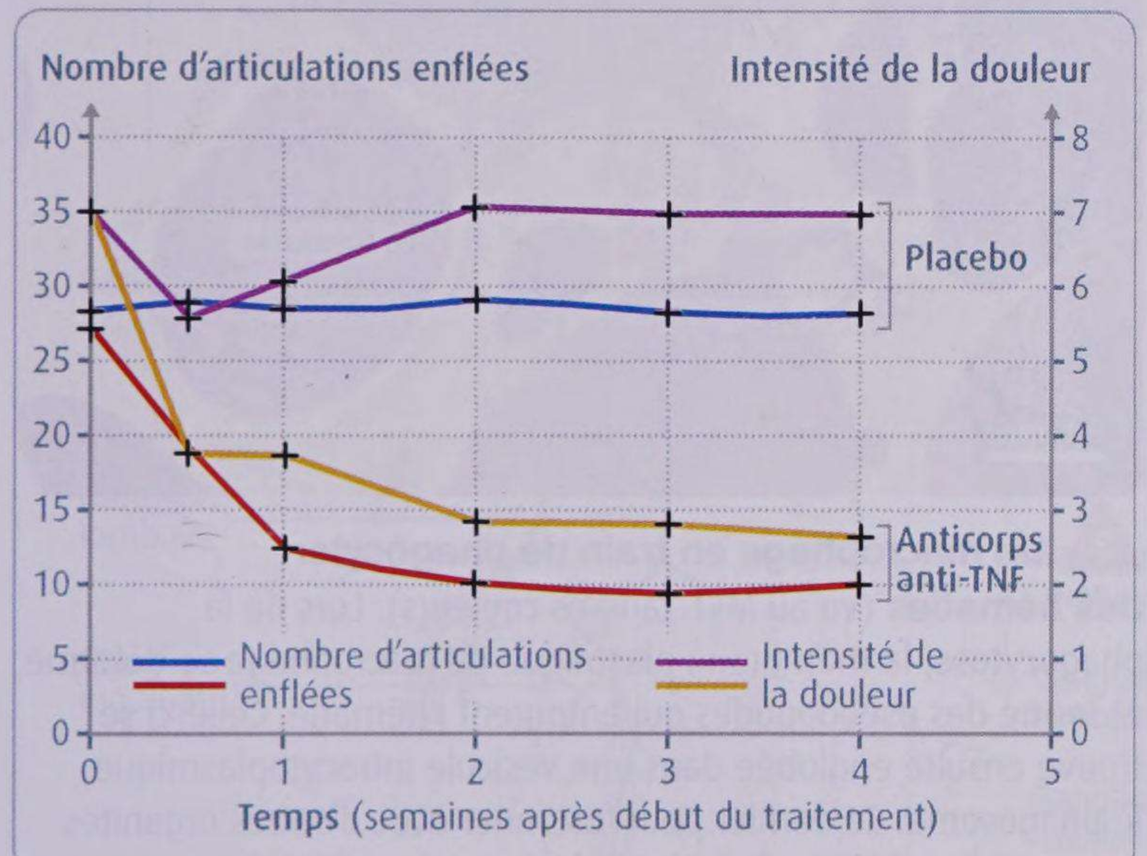
Une inflammation chronique est une réaction inflammatoire qui, pour des raisons mal connues, se poursuit dans le temps et cause de sévères dégâts aux tissus touchés. Ainsi, la polyarthrite rhumatoïde est une inflammation chronique des articulations qui touche 0,5 à 1 % de la population en France. Autre exemple : les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin qui, dans l'Hexagone, concernent plus de 100 000 personnes. L'incidence* de l'une ces maladies (maladie de Crohn) est passée de 5,2 en 1988-90 à 6,7 en 2006-07. Des traitements à base de médicaments anti-inflammatoires sont souvent les seules solutions thérapeutiques des inflammations chroniques.

* Nombre de nouveaux cas par an pour 100 000 habitants.

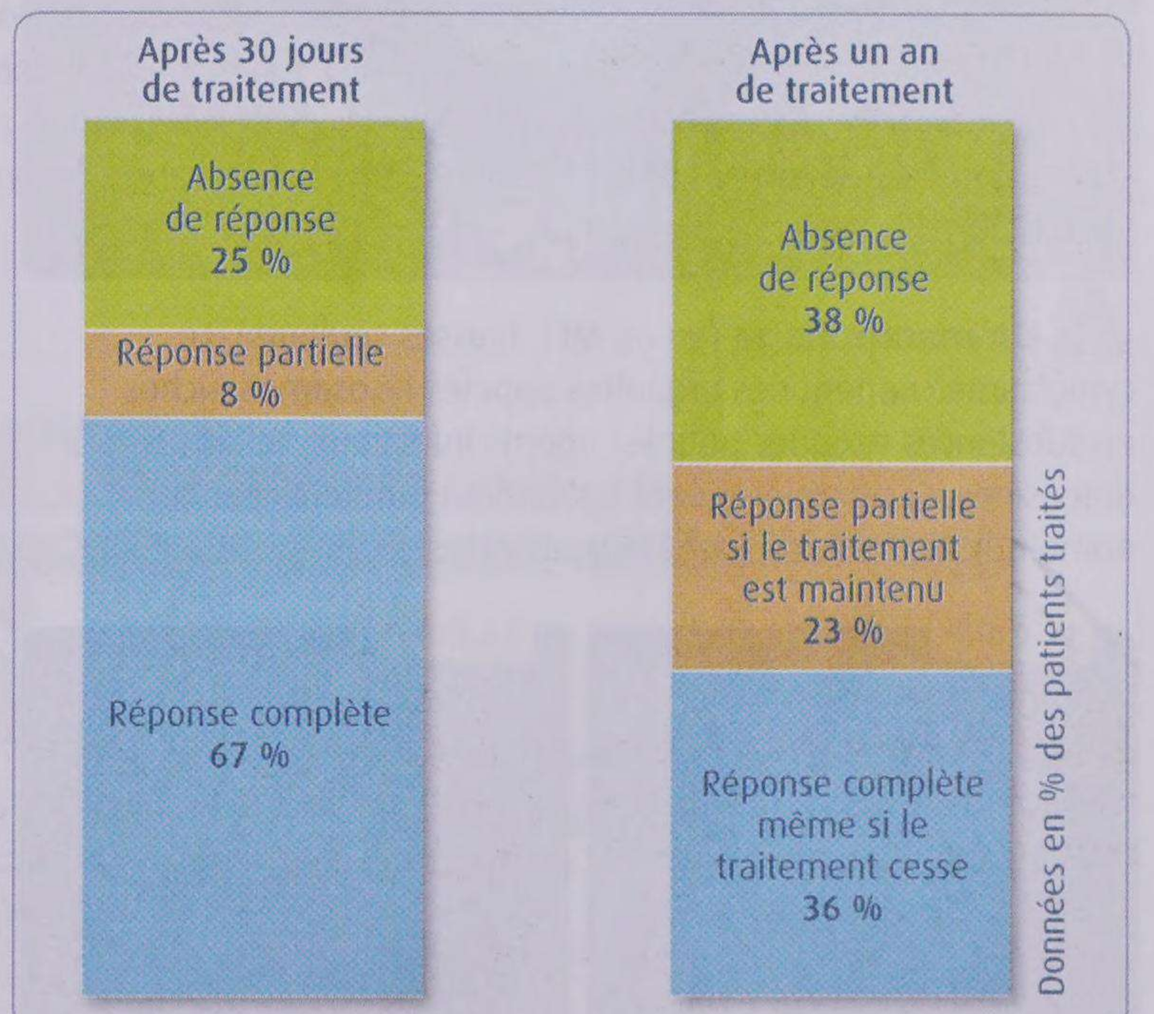
5 Un problème de santé publique : les maladies inflammatoires chroniques.



6 Le mode d'action des anti-inflammatoires non stéroïdiens. L'aspirine et ses dérivés, ainsi que d'autres molécules comme l'ibuprofène sont des anti-inflammatoires non stéroïdiens. Les prostaglandines sont de puissants médiateurs chimiques de l'inflammation.



7 Étude clinique d'un traitement de la polyarthrite rhumatoïde. L'évolution de la maladie est comparée chez des volontaires ayant reçu soit une substance sans effet (placebo), soit un traitement à base d'anticorps empêchant l'action du TNF. Ce traitement, introduit en 1998, a constitué une vraie révolution, mais il est coûteux et possède des effets secondaires (augmentation du risque d'infections respiratoires).



8 Étude clinique d'un traitement des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin. On a suivi pendant une année la réponse de 165 patients à un traitement par l'aspirine (réponse complète = disparition des symptômes).

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 4.** Analysez les résultats expérimentaux et les observations, puis expliquez quelles manifestations de la réaction inflammatoire peuvent s'expliquer par l'action des deux médiateurs chimiques étudiés.

2 **DOC. 5 À 8.** Évaluez l'effet des différents traitements et proposez une explication au mode d'action de l'anti-inflammatoire concerné. Expliquez quelques difficultés rencontrées dans la mise en œuvre des traitements.

3 **EN CONCLUSION.** Récapitulez quelques exemples d'action des médiateurs chimiques de l'inflammation et des médicaments anti-inflammatoires.

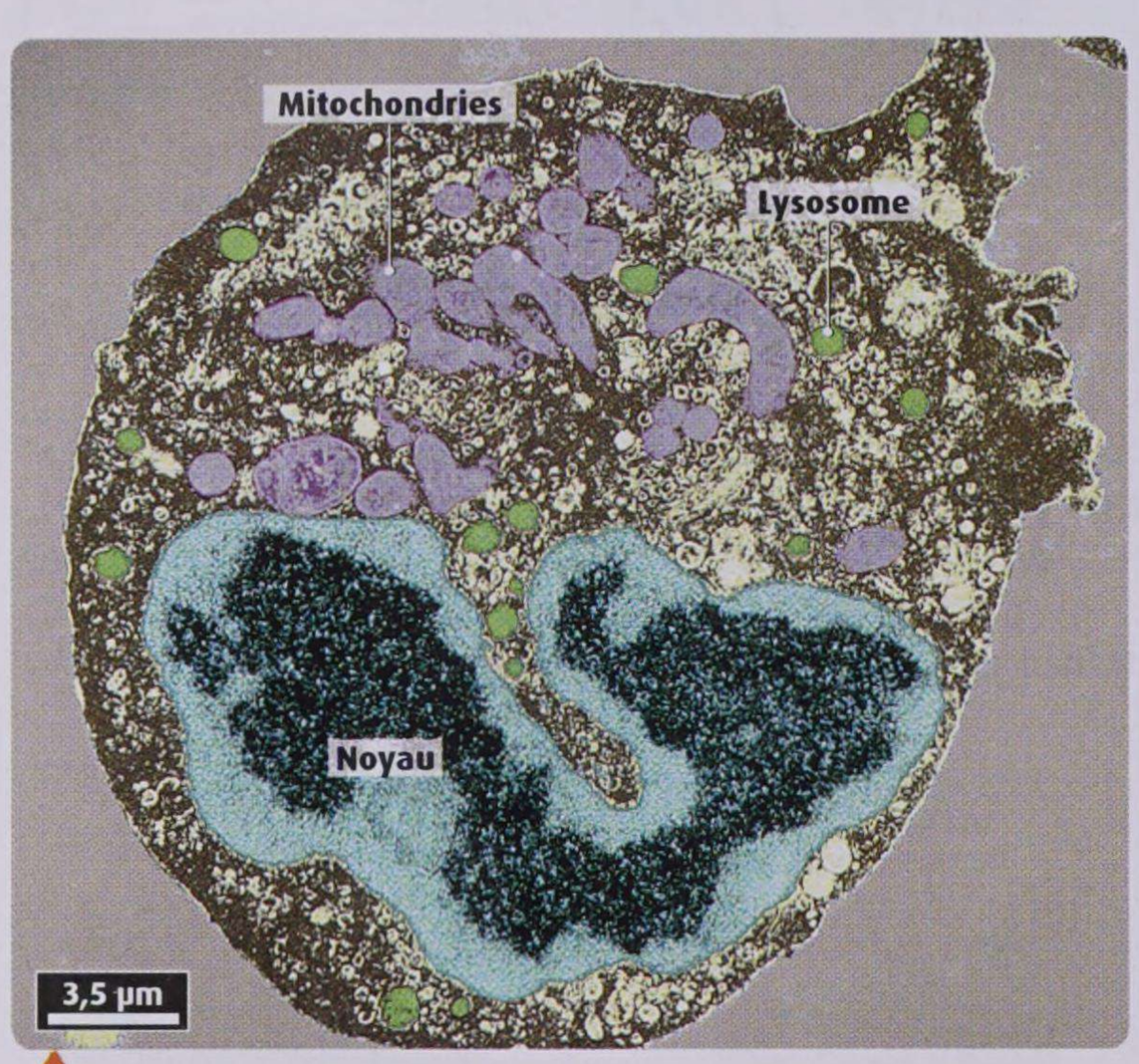
UNITÉ 4

L'issue de la réaction inflammatoire aiguë

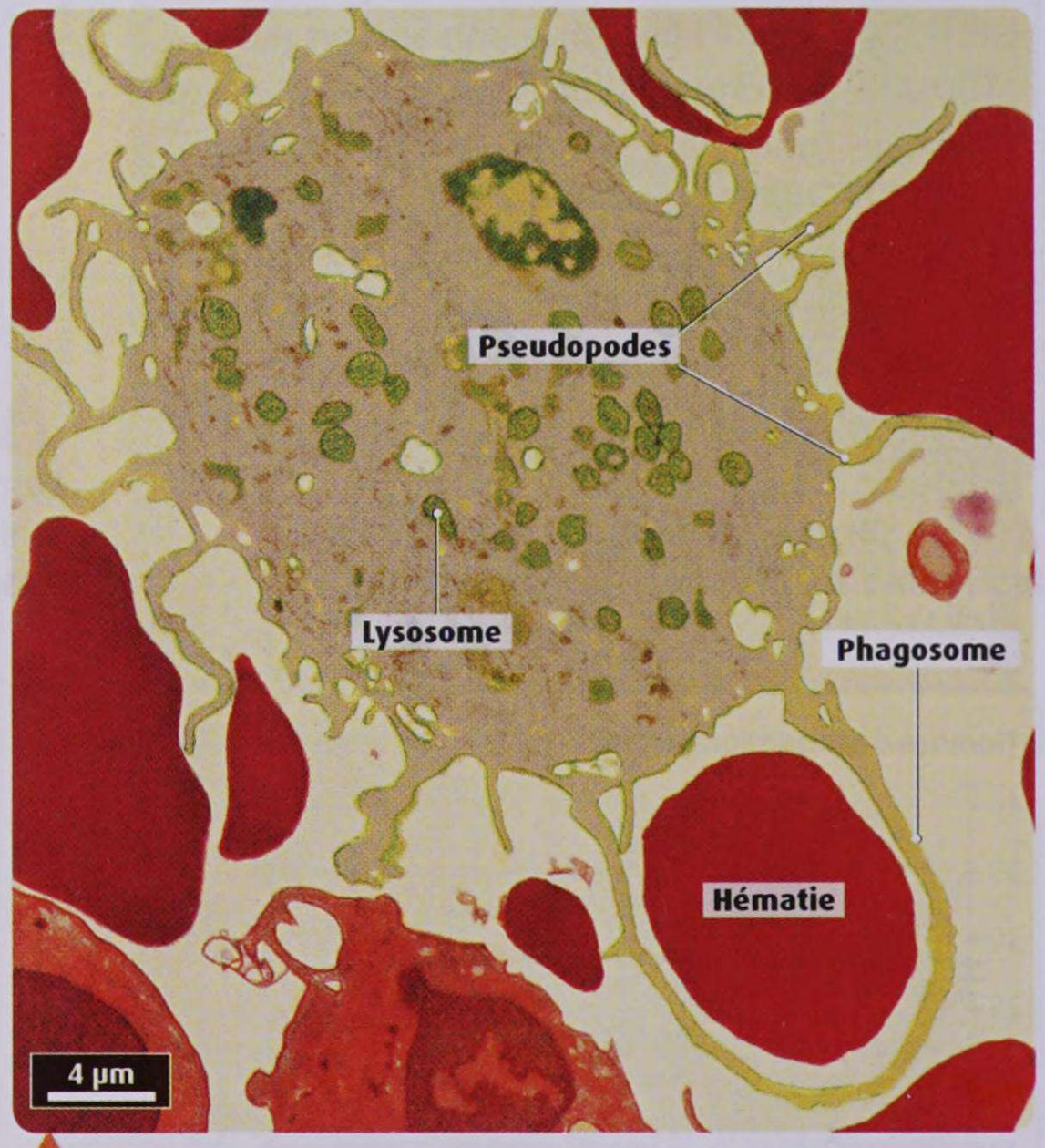
Les médiateurs chimiques de l'inflammation produits par les cellules sentinelles déclenchent un afflux de plasma sanguin et le recrutement de cellules phagocytaires (macrophages et granulocytes) vers les foyers infectieux.

Comment ces événements permettent-ils de lutter contre les agents infectieux ?

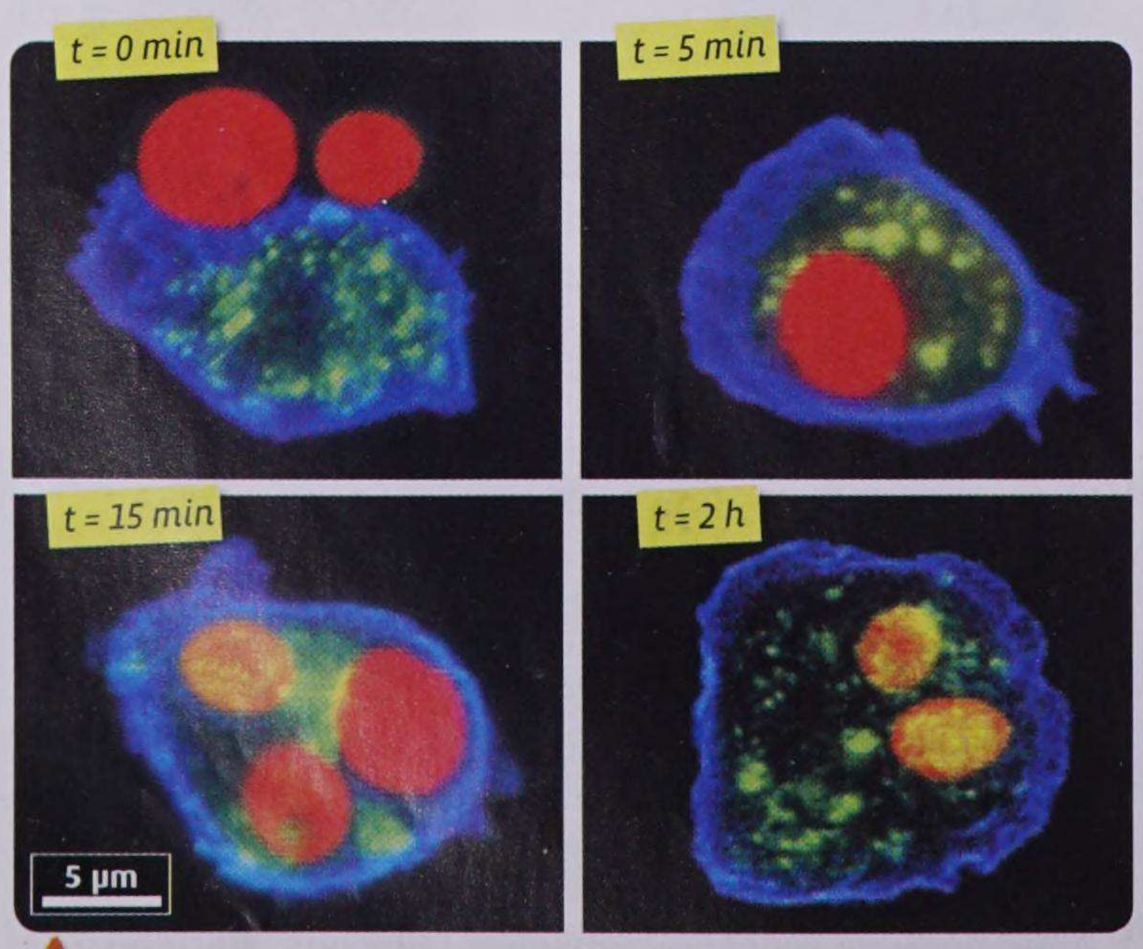
L'élimination des agents infectieux



1 Un macrophage (vu au MET, fausses couleurs). Le cytoplasme contient des organites appelés lysosomes, riches en substances toxiques pour les agents infectieux, telles les défensines. Ces dernières sont également produites par de nombreux organismes (végétaux, insectes, etc.).

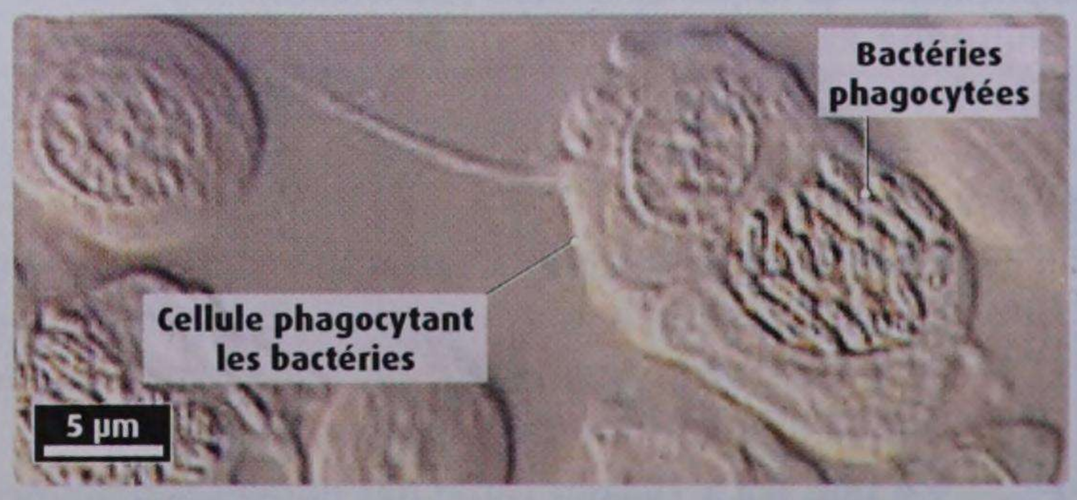


2 Un macrophage en train de phagocyter des hématies (vu au MET, fausses couleurs). Lors de la phagocytose, la membrane plasmique du macrophage se déforme et forme des pseudopodes qui entourent l'hématie. Celle-ci se trouve ensuite englobée dans une vésicule intracytoplasmique : le phagosome. Ce dernier peut fusionner avec d'autres organites présents dans le cytoplasme du phagocyte.



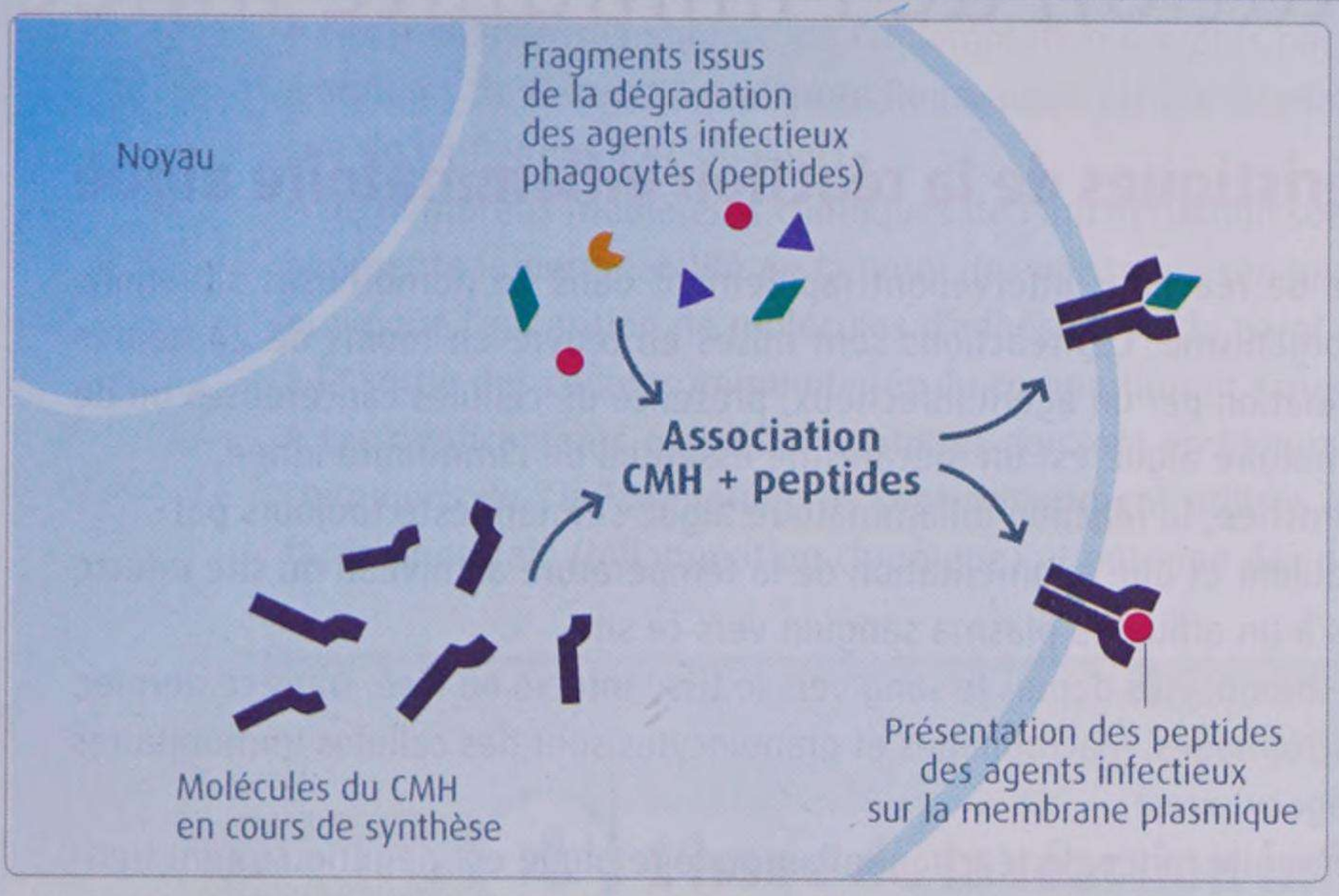
3 Suivi de la phagocytose de levures par un macrophage grâce à des marqueurs fluorescents (photos au MO). Les levures sont marquées par une fluorescence rouge, la membrane plasmique du macrophage par une fluorescence bleue et les lysosomes par une fluorescence verte. Le mélange des fluorescences vertes et rouges donne une fluorescence jaune.

On injecte des bactéries à un embryon de poisson-zèbre préservé de tout contact avec les microorganismes de l'environnement. Après 20 min., on observe l'arrivée de cellules phagocytant les bactéries (photo au MO). En moins de 5 h, toutes les bactéries ont été digérées.



4 Des observations chez l'embryon.

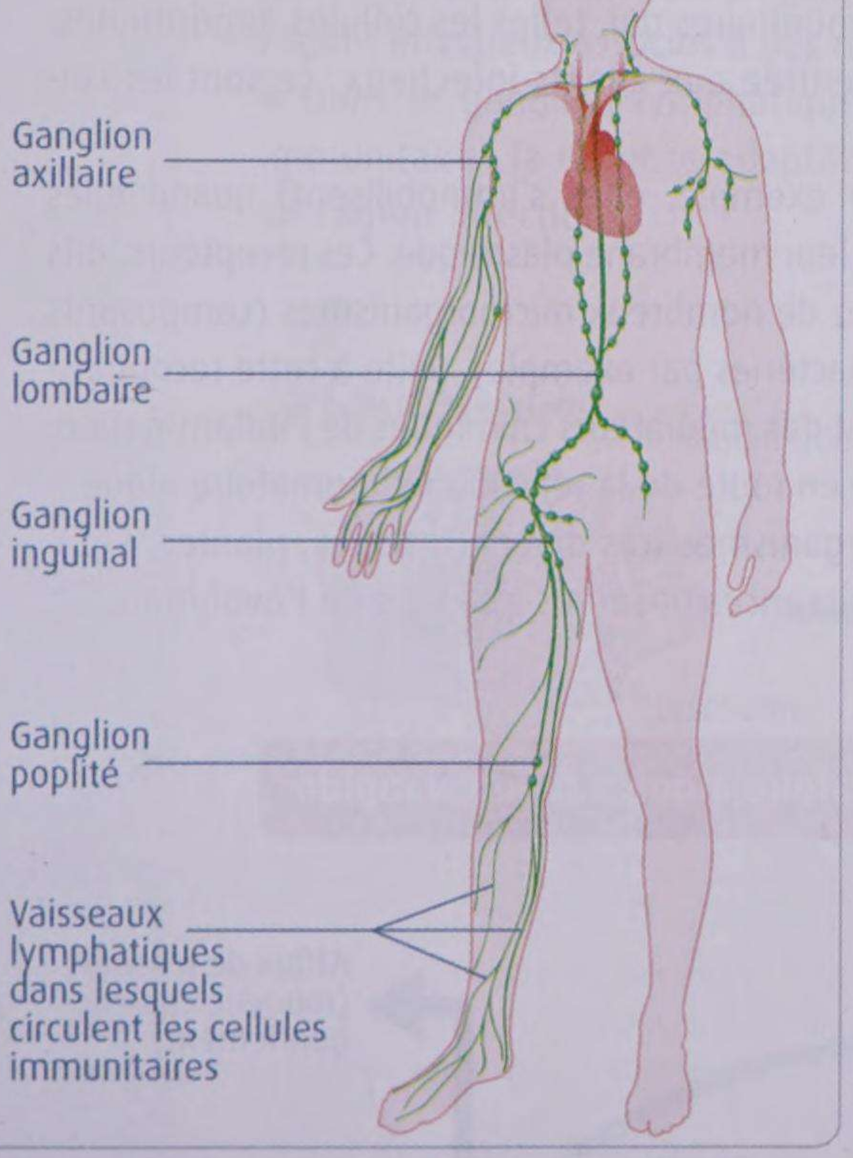
Les prolongements de la réaction inflammatoire



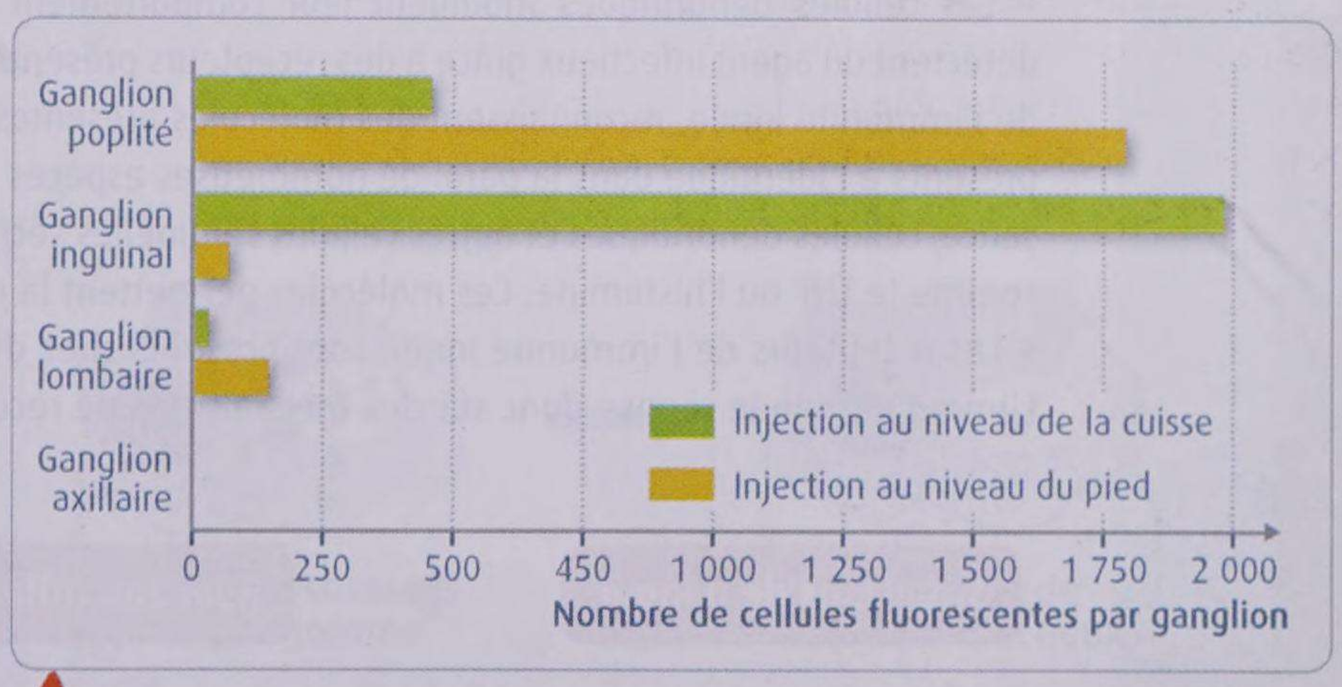
La formation de complexes CMH-peptide à la membrane plasmique d'une cellule dendritique.

L'immunité innée est parfois insuffisante pour aboutir à l'élimination d'un agent infectieux. Dans ce cas, les cellules dendritiques jouent un rôle clé pour initier une nouvelle phase de la réponse immunitaire, dite lente ou adaptative, impliquant la production d'anticorps et de lymphocytes T. Les cellules dendritiques peuvent phagocyter les agents infectieux et les débris de cellules infectées par un virus. Elles digèrent alors une fraction des protéines de l'agent infectieux. Les peptides (fragments protéiques) issus de cette digestion sont associés à des molécules en forme de cupule présentes sur la membrane plasmique : les molécules du CMH.

5 Le rôle clé des cellules dendritiques.



6 Les ganglions lymphatiques chez l'Homme. Les ganglions lymphatiques sont les organes dans lesquels la réaction immunitaire adaptative est mise en route. Les cellules dendritiques jouent un rôle clé dans ce processus. Seuls les ganglions de la partie droite du corps ont été représentés.



7 Le devenir des cellules dendritiques. Des cellules dendritiques exprimant un composé fluorescent sont mises en présence de bactéries. Après 24 heures, elles sont injectées à des souris, soit au niveau de la cuisse, soit au niveau du pied. Deux jours plus tard, on compte le nombre de cellules fluorescentes dans différents ganglions lymphatiques.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Reconstituez la chronologie des événements à l'origine de l'élimination d'un agent infectieux par une cellule phagocytaire.

2 **DOC. 4.** Indiquez en quoi ces données montrent que l'immunité innée ne nécessite pas d'apprentissage préalable.

3 **DOC. 5 À 7.** Mettez en relation les documents pour montrer en quoi les cellules dendritiques préparent le déclenchement des réactions immunitaires adaptatives.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez le rôle de la réaction inflammatoire dans la lutte contre les agents infectieux.

BILAN DES UNITÉS

CHAPITRE 1

La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée

UNITÉ 1 Les caractéristiques de la réaction inflammatoire aiguë

• L'immunité innée est un ensemble de réactions intervenant rapidement dans de nombreuses situations potentiellement dangereuses pour l'organisme. Ces réactions sont mises en œuvre en moins de 24 heures en des circonstances variées : contamination par un agent infectieux, présence de cellules cancéreuses ou de lésions tissulaires. La réaction inflammatoire aiguë est un mécanisme essentiel de l'immunité innée.

• Quel que soit le facteur qui l'a déclenchée, la réaction inflammatoire aiguë se manifeste toujours par :
– un gonflement, une rougeur, une douleur et une augmentation de la température au niveau du site infecté ou lésé. Ces symptômes sont associés à un afflux de plasma sanguin vers ce site.
– une migration de granulocytes et de monocytes depuis le sang vers le tissu infecté ou lésé. Dans ce dernier, les monocytes se différencient en macrophages. Macrophages et granulocytes sont des cellules immunitaires réalisant la phagocytose (cellules phagocytaires).

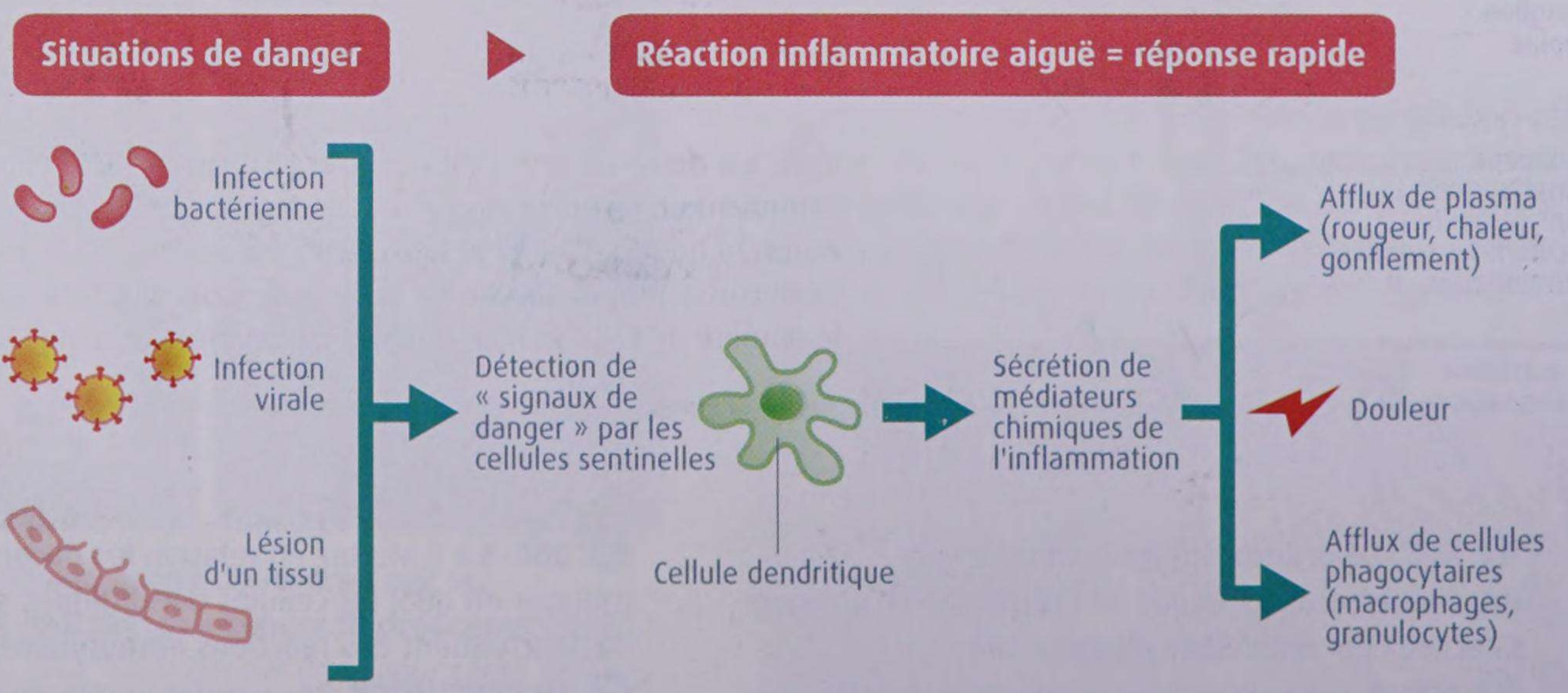
• Comme toutes les réactions de l'immunité innée, la réaction inflammatoire aiguë est génétiquement héritée, présente dès la naissance et mise en route de façon très rapide dès la première rencontre de l'organisme avec une situation de danger. Elle ne nécessite donc pas d'apprentissage préalable.

UNITÉ 2 L'initiation de la réaction inflammatoire aiguë

• La réaction inflammatoire aiguë est initiée par des cellules immunitaires qui, telles les cellules dendritiques, patrouillent en permanence dans les tissus servant de porte d'entrée aux agents infectieux : ce sont les cellules sentinelles.

• Les cellules dendritiques modifient leur comportement (par exemple, elles s'immobilisent) quand elles détectent un agent infectieux grâce à des récepteurs présents sur leur membrane plasmique. Ces récepteurs, dits de l'immunité innée, reconnaissent des molécules présentes chez de nombreux microorganismes (composants présents à l'identique dans la paroi de nombreuses espèces de bactéries par exemple). Suite à cette reconnaissance, cellules dendritiques et autres cellules sentinelles sécrètent des médiateurs chimiques de l'inflammation, comme le TNF ou l'histamine. Ces molécules permettent la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë.

• Les récepteurs de l'immunité innée sont présents chez des organismes très divers (insectes, plantes, etc.). L'immunité innée repose donc sur des mécanismes de reconnaissance conservés au cours de l'évolution.



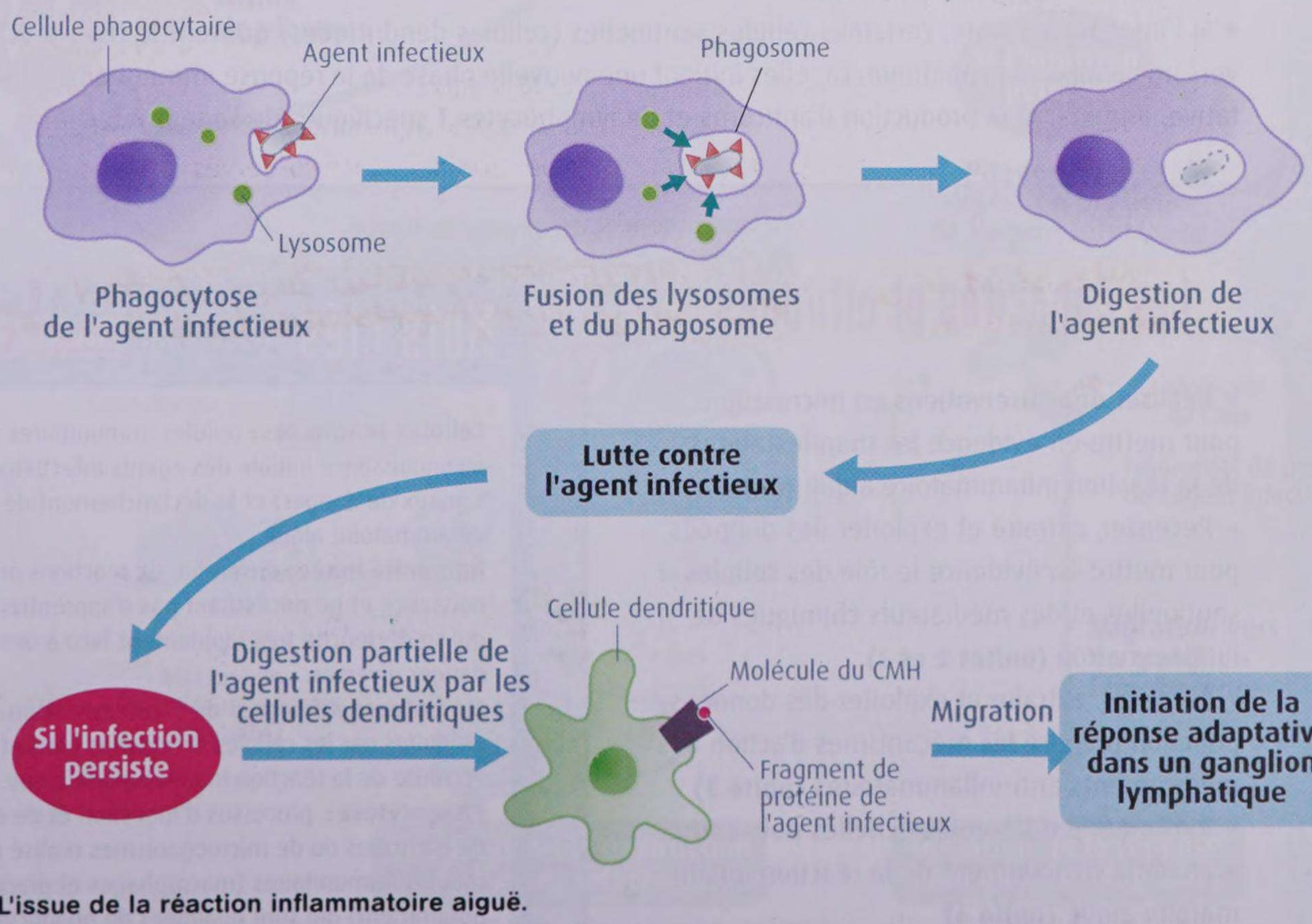
Initiation et symptômes de la réaction inflammatoire aiguë.

UNITÉ 3 L'action des médiateurs chimiques de l'inflammation

- Les médiateurs chimiques de l'inflammation sécrétés par les cellules sentinelles sont à l'origine des manifestations de la réaction inflammatoire aiguë (afflux de plasma et de cellules immunitaires sanguines sur le site de l'inflammation, douleur).
- De nombreux médiateurs chimiques de l'inflammation sont produits, dont l'histamine et le TNF. L'histamine augmente la perméabilité de la paroi des vaisseaux sanguins, déclenchant un afflux local de plasma. Le TNF provoque l'apparition de molécules d'adhésion sur la paroi interne des vaisseaux sanguins, contribuant ainsi à la sortie des cellules immunitaires du compartiment sanguin.
- Les médicaments anti-inflammatoires agissent en bloquant la sécrétion ou l'action de certains médiateurs chimiques de l'inflammation. Ils sont notamment utilisés lorsque la réaction inflammatoire se prolonge de façon anormale (inflammation chronique) et entraîne des dommages aux tissus.

UNITÉ 4 L'issue de la réaction inflammatoire aiguë

- Sur le site de l'inflammation, les granulocytes et les macrophages participent à l'élimination des agents infectieux grâce au processus de phagocytose : l'agent infectieux est ingéré par la cellule phagocytaire puis détruit par des substances toxiques. Certaines de ces substances toxiques sont également produites par des insectes ou des plantes. L'immunité innée repose donc sur des mécanismes d'action conservés au cours de l'évolution.
- Lorsque les mécanismes de l'immunité innée ne suffisent pas à éliminer un agent infectieux, les cellules dendritiques migrent vers un ganglion lymphatique. Elles emportent avec elles des fragments de protéines de l'agent infectieux associés à des molécules présentes sur leur membrane plasmique : les molécules du CMH.
- Dans le ganglion lymphatique, les cellules dendritiques initieront une nouvelle phase de la réponse immunitaire : la réponse adaptative, impliquant la production d'anticorps et de lymphocytes T spécifiques de l'agent infectieux.



L'issue de la réaction inflammatoire aiguë.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 1

La réaction inflammatoire, une manifestation de l'immunité innée

L'essentiel par le texte

Les caractéristiques de l'immunité innée

• L'**immunité innée** est un ensemble de réactions qui se déclenche très rapidement face à des situations de danger diverses : infection par une grande variété de microorganismes, présence d'une tumeur ou d'une lésion des tissus.

• Les réactions de l'immunité innée sont présentes dès la naissance et sont génétiquement héritées. Mises en route de façon stéréotypée et avec la même rapidité dès la première rencontre avec une situation de danger, elles ne nécessitent pas d'apprentissage préalable.

• Les cellules et les molécules impliquées dans l'immunité innée sont présentes chez des organismes très divers. Elles sont donc sont apparues assez tôt au cours de l'évolution.

• La réaction inflammatoire aiguë est un des mécanismes essentiels de l'immunité innée.

Déroulement et issue de la réaction inflammatoire aiguë

• La réaction inflammatoire aiguë est initiée par des cellules immunitaires patrouillant en permanence dans les tissus. Ces cellules, dites **cellules sentinelles**, détectent les agents infectieux (et d'autres signaux de danger) grâce à des récepteurs présents sur leur membrane plasmique. La détection de signaux de danger par ces récepteurs induit la sécrétion de **médiateurs chimiques de l'inflammation**. Parmi de nombreux autres effets, ces molécules solubles provoquent :

– un afflux de plasma sanguin au niveau du site touché, à l'origine du gonflement, de la rougeur et de la chaleur associés à la réaction inflammatoire aiguë.

– une migration de cellules immunitaires (granulocytes et monocytes) depuis le sang vers le tissu touché. Les monocytes se transforment en macrophages dans les tissus.

• Grâce à la **phagocytose** et à la production de molécules toxiques, granulocytes et macrophages contribuent à l'élimination des agents infectieux.

• Si l'infection persiste, certaines cellules sentinelles (cellules dendritiques) quittent le tissu touché et migrent vers un ganglion lymphatique. Là, elles initient une nouvelle phase de la réponse immunitaire : la réponse adaptative, impliquant la production d'anticorps et de lymphocytes T spécifiques de l'agent infectieux.

Les capacités et attitudes

- Réaliser des observations en microscopie pour mettre en évidence les manifestations de la réaction inflammatoire aiguë **(unité 1)**
- Recenser, extraire et exploiter des données pour mettre en évidence le rôle des cellules sentinelles et des médiateurs chimiques de l'inflammation **(unités 2 et 3)**
- Recenser, extraire et exploiter des données pour comprendre les mécanismes d'action des médicaments anti-inflammatoires **(unité 3)**
- Raisonner à différentes échelles pour comprendre le dénouement de la réaction inflammatoire aiguë **(unité 4)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Cellules sentinelles : cellules immunitaires assurant la reconnaissance initiale des agents infectieux (et d'autres signaux de danger) et le déclenchement de la réaction inflammatoire aiguë.

Immunité innée : ensemble de réactions présentes dès la naissance et ne nécessitant pas d'apprentissage préalable, qui se déclenche très rapidement face à des situations de danger diverses.

Médiateurs chimiques de l'inflammation : molécules produites par les cellules sentinelles permettant la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë.

Phagocytose : processus d'ingestion et de destruction de particules ou de microoganismes réalisé par certaines cellules immunitaires (macrophages et granulocytes notamment) qui sont qualifiées de phagocytes.

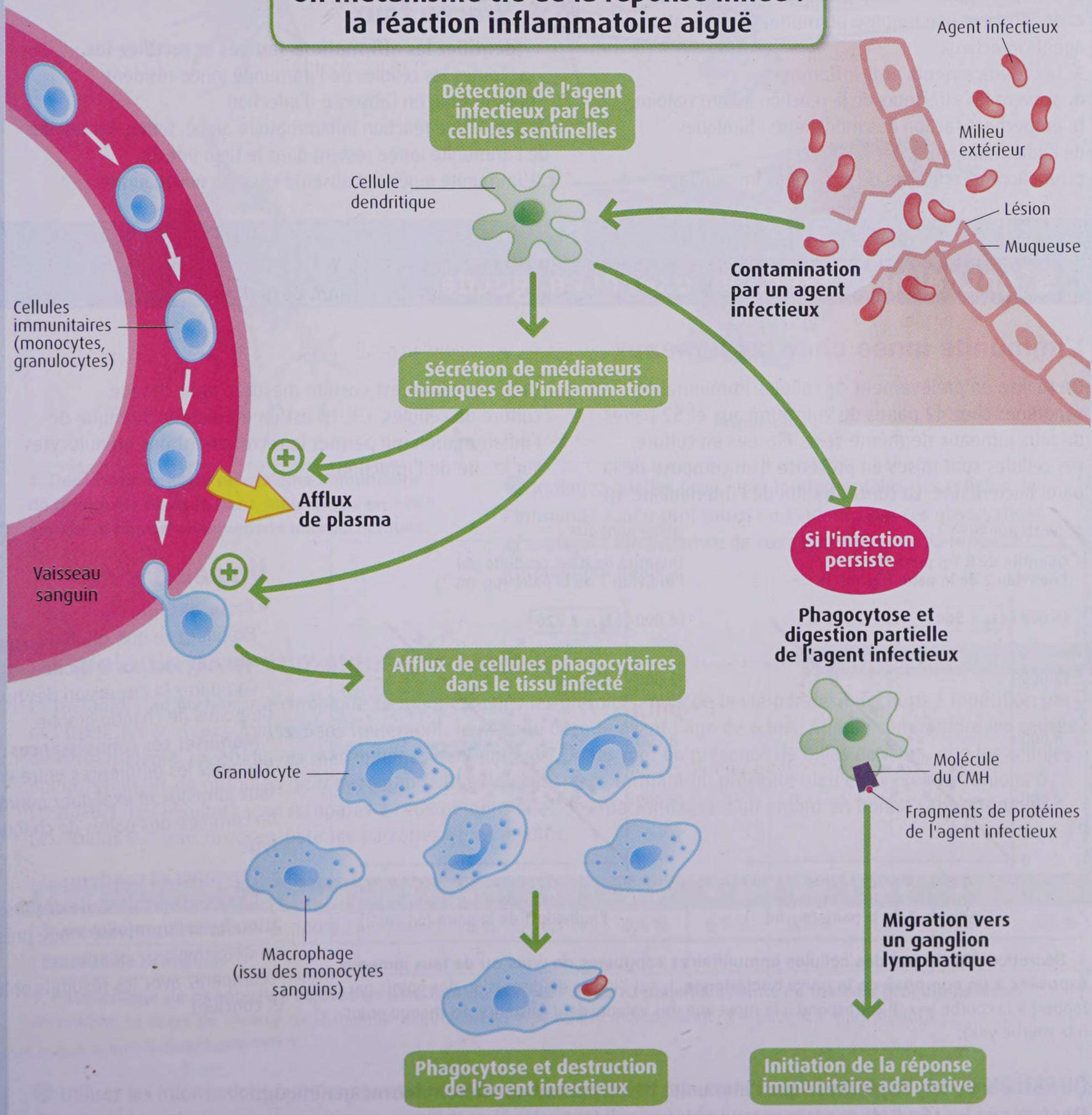
L'essentiel par l'image

Les caractéristiques de la réponse immunitaire innée

- Présente dès la naissance
- Déclenchée rapidement
- Déclenchée dans des situations variées (infection par une grande diversité de microorganismes, lésions des tissus)
- Ne nécessite pas d'apprentissage préalable

→ **Première ligne de défense rapidement mise en œuvre**

Un mécanisme clé de la réponse innée : la réaction inflammatoire aiguë



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La réaction inflammatoire aiguë:

a. ne s'observe que lors d'infections bactériennes.

b. est un élément essentiel de la réponse immunitaire innée.

c. se déroule dans les ganglions lymphatiques.

2. Les médiateurs chimiques de l'inflammation:

a. sont sécrétés par les cellules infectées.

b. sont des substances toxiques pour les pathogènes.

c. déclenchent une réponse permettant l'élimination des agents infectieux.

3. Les médicaments anti-inflammatoires:

a. activent les effecteurs de la réaction inflammatoire.

b. empêchent l'action des médiateurs chimiques de l'inflammation.

c. améliorent l'efficacité de la réponse immunitaire.

2 Qui sommes-nous ?

a. Présentes en permanence dans les tissus périphériques, nous sommes des cellules capables de reconnaître les éléments étrangers à l'organisme et de déclencher la réaction inflammatoire aiguë.

b. Sécrétés par les cellules immunitaires, nous contribuons au déclenchement de la réponse immunitaire innée.

3 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. Toutes les cellules de l'immunité innée résident dans le sang en l'absence d'infection.

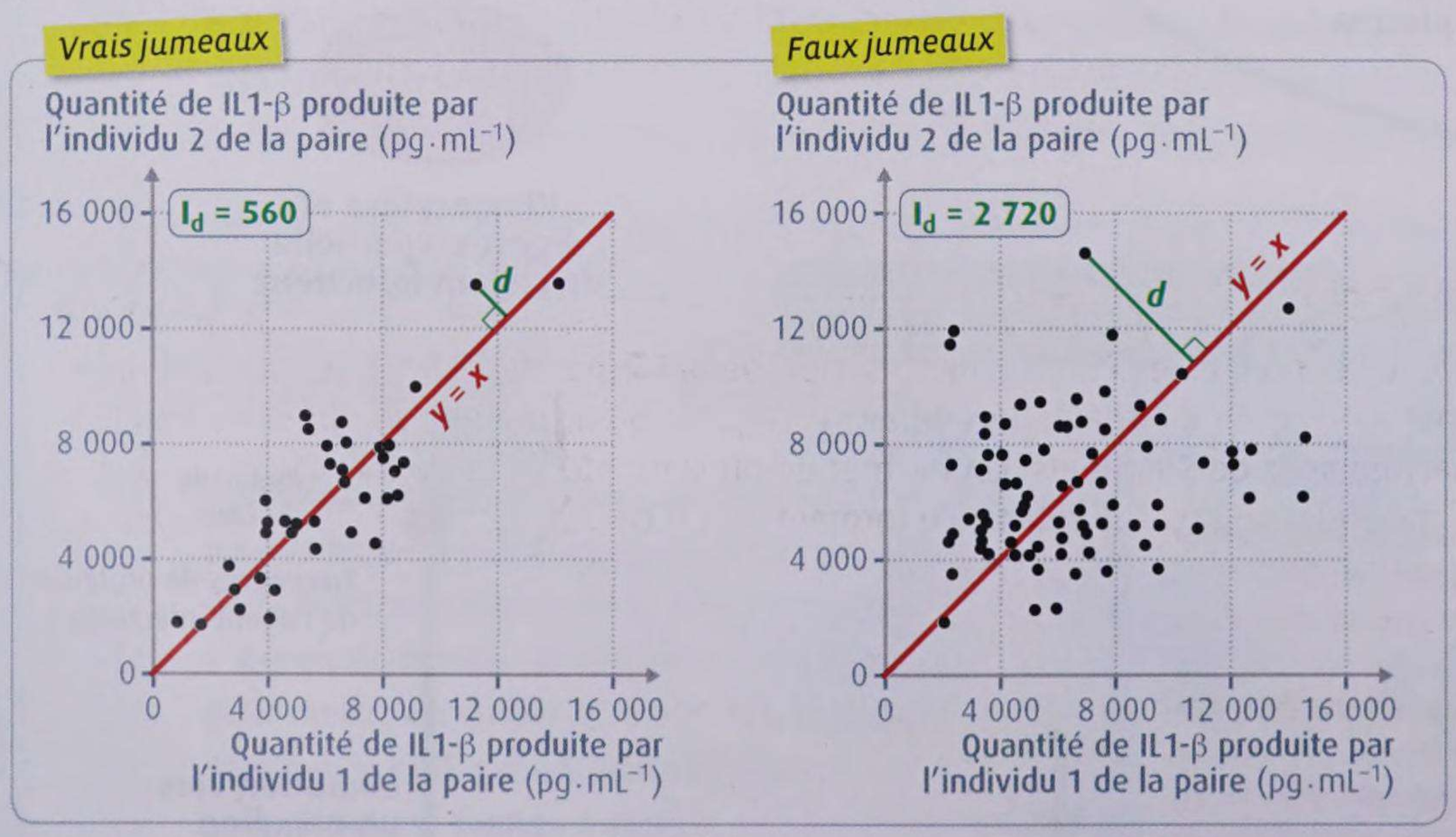
b. Lors d'une réaction inflammatoire aiguë, toutes les cellules de l'immunité innée restent dans le tissu infecté.

c. L'immunité innée est absente chez les nouveau-nés.

s'entraîner avec un exercice guidé

4 L'immunité innée chez les jumeaux

On réalise un prélèvement de cellules immunitaires sanguines chez 42 paires de vrais jumeaux et 52 paires de faux jumeaux de même sexe. Placées en culture, ces cellules sont mises en présence d'un composé de la paroi bactérienne. La concentration de l'interleukine 1β (IL-1β) produite est ensuite mesurée pour chaque culture de cellules. L'IL-1β est un médiateur chimique de l'inflammation qui permet le recrutement des granulocytes sur le site de l'infection.



1. Sécrétion d'IL-1β par des cellules immunitaires sanguines de vrais ou de faux jumeaux exposées à un composé de la paroi bactérienne. I_d est l'indice de dispersion des points par rapport à la courbe y=x. Il correspond à la moyenne des valeurs de d (distance de chaque point à la courbe y=x).

Un peu d'aide

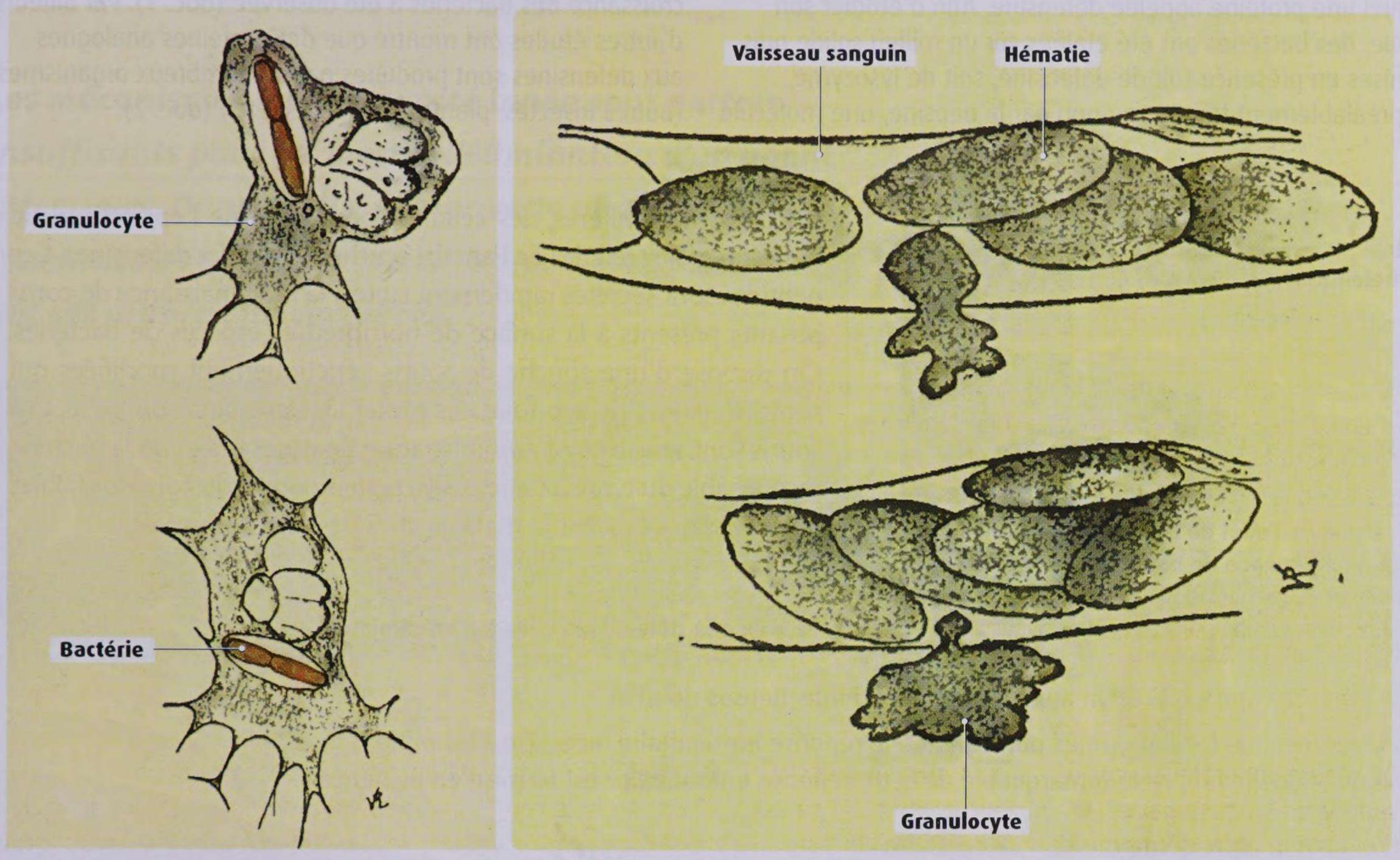
- **Saisir des informations:**
  - Expliquez ce que signifie qu'un point est placé sur la droite y=x.
  - Comparez la dispersion des nuages de points de chaque graphe.
- **Mobiliser ses connaissances:**
  Rappelez les différences entre vrais et faux jumeaux et expliquez pourquoi on compare des paires de chaque type.
- **Raisonner et conclure:**
  - Donnez les résultats de dispersion attendus si l'immunité innée présente un déterminisme génétique.
  - Comparez avec les résultats obtenus et concluez.

QUESTION On fait l'hypothèse que l'immunité innée présente un déterminisme génétique. Montrez que les résultats expérimentaux obtenus valident cette hypothèse.

5 Les observations d'Ilya Metchnikov (1845-1916)

Observer et raisonner

À la fin du XIXe siècle, le zoologiste russe Ilya Metchnikov (prix Nobel de médecine 1908) réalisa de nombreuses observations microscopiques afin de comprendre les mécanismes par lesquels les animaux se défendent contre les microorganismes pathogènes.



1. Dessins de cellules du système immunitaire de grenouille réalisés par I. Metchnikov en 1891, sur sur la base d'observations microscopiques.

● Indiquez quelles propriétés fondamentales des cellules de l'immunité innée sont mises en évidence par ces observations et expliquez l'importance de ces propriétés pour la réponse immunitaire innée.

6 La maladie granulomateuse chronique

Analyser des résultats expérimentaux

La maladie granulomateuse chronique se manifeste dès les premiers mois de la vie par des infections à répétition par des bactéries et champignons. Sans traitement, le malade décède avant l'âge de 6 ans. Afin de comprendre les causes de cette maladie, on étudie les macrophages de 9 patients. On les met en présence de billes de latex, que les cellules phagocytent, et de nitrobleu de tétrazolium (NBT), une substance formant un précipité bleu en présence d'anions O_2^- (test NBT). Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec des macrophages d'un enfant en bonne santé (témoin). Les anions O_2^- sont toxiques pour les bactéries et les levures.

Patient	Témoin	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5	n° 6	n° 7	n° 8	n° 9	n° 10
% de cellules colorées	100 %	0 %	0 %	0,1 %	0,4 %	0,7 %	0,7 %	1,2 %	3,5 %	5,3 %
Sévérité de la maladie	–	9	7	8	5	6	1	4	3	2

1. Pourcentage de phagocytes colorés en bleu lors du test NBT chez 10 patients atteints de maladie granulomateuse chronique. Le degré de sévérité de la maladie est indiqué (1 = patient le moins atteint ; 9 = patient le plus atteint).

● Utilisez les informations fournies et vos connaissances pour proposer une explication à la maladie granulomateuse chronique.

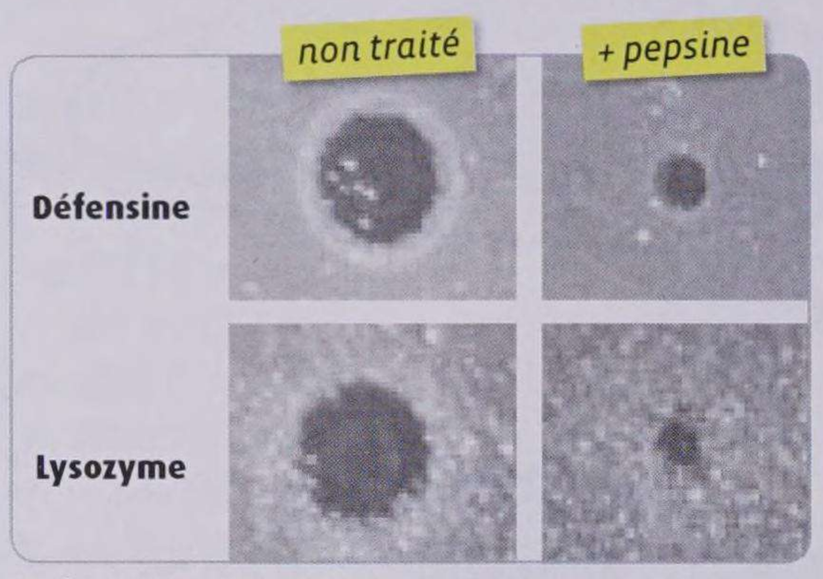
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

7 Les propriétés anti-infectieuses du miel

Analyser des résultats expérimentaux

On connaît depuis fort longtemps les propriétés anti-infectieuses du miel. Récemment, on a isolé à partir du miel une protéine appelée défensine. Afin d'étudier son rôle, des bactéries ont été étalées sur un milieu solide puis mises en présence soit de défensine, soit de lysozyme, (préalablement traitées ou non par la pepsine, une molécule détruisant les protéines). Le lysosyme est une protéine présentant une activité antibactérienne. Après 12 heures, la croissance des bactéries a été observée (doc. 1). Par ailleurs, d'autres études ont montré que des protéines analogues aux défensines sont produites par de nombreux organismes (autres insectes, plantes, vertébrés, etc.) (doc. 2).



1. Étude de l'effet de la défensine du miel sur la croissance de bactéries. Lorsqu'elles se multiplient, les bactéries forment un tapis continu sur le milieu solide où elles sont cultivées.

Chez les mammifères, des cellules spécialisées de l'épithélium de l'intestin grêle (cellules de Paneth) synthétisent deux défensines. Ces peptides sont sécrétés rapidement suite à la reconnaissance de composants présents à la surface de nombreuses espèces de bactéries. On dispose d'une souche de souris génétiquement modifiées qui sont incapables de produire ces protéines dans l'intestin grêle. Ces souris sont sensibles à l'administration de doses orales de la bactérie responsable du typhus (*Salmonella typhimurium*) dix fois plus faibles que celles qui causent la maladie chez des souris normales.

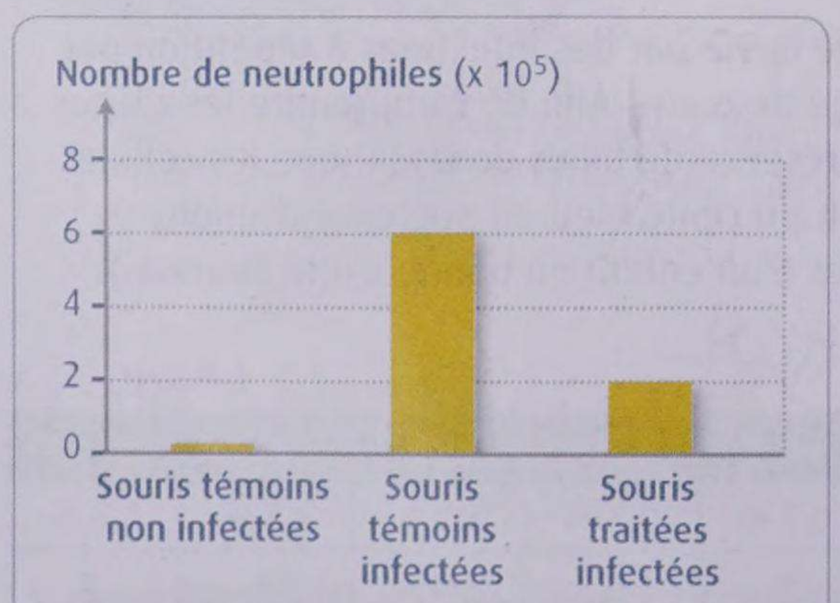
2. Le rôle des défensines chez les mammifères.

1. Proposez une explication aux propriétés anti-infectieuses du miel.
2. Montrez que les défensines participent à la réponse immunitaire innée chez les mammifères. Indiquez quelle propriété remarquable de cette réponse immunitaire est ici mise en évidence.

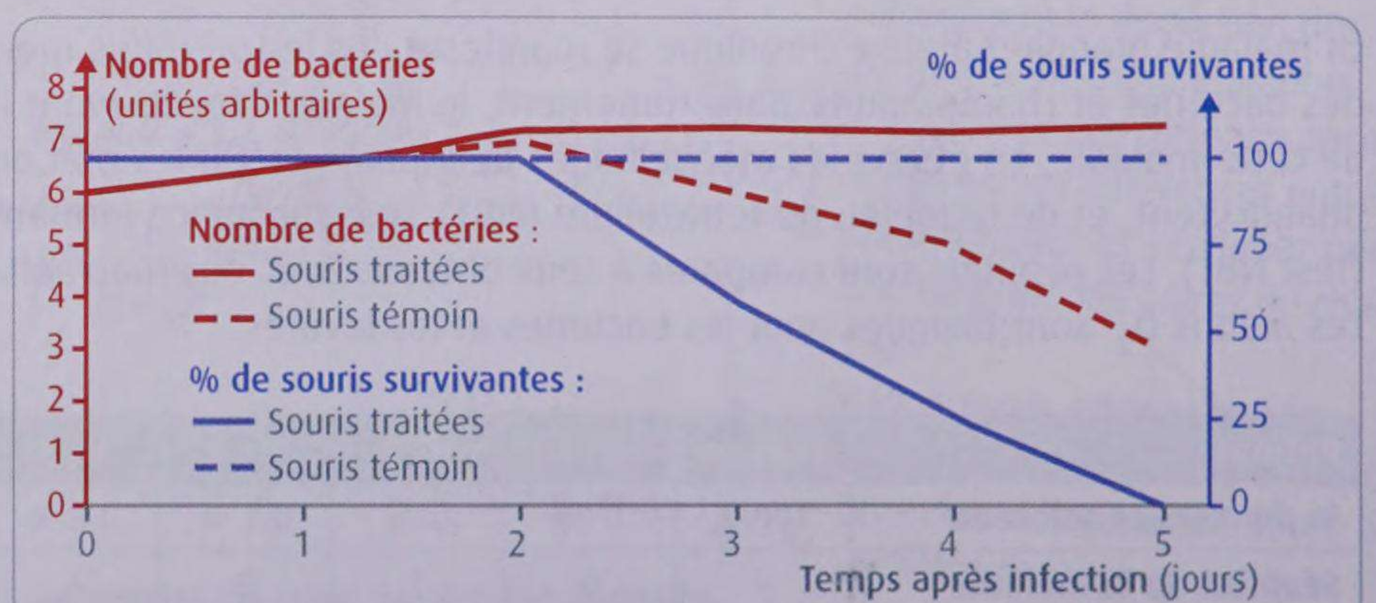
8 L'immunité innée contre la légionellose

Analyser des résultats expérimentaux

La légionellose est une infection pulmonaire grave provoquée par la bactérie *Legionella pneumophila*. Cette bactérie prolifère dans les eaux tièdes et la plupart des contaminations sont dues aux réseaux de distribution d'eau ou aux systèmes de climatisation. On étudie le rôle d'une protéine appelée MIP2, produite lors de la réponse immunitaire faisant suite à une infection par *Legionella pneumophila*. On dispose pour cela de souris pour lesquelles la fixation de la protéine MIP2 sur son récepteur est inactivée expérimentalement (souris traitées). Ce récepteur est exprimé sur la membrane plasmique de certains granulocytes : les neutrophiles.



1. Évolution du nombre de neutrophiles présents dans le tissu pulmonaire chez les souris témoin et chez les souris traitées. Les données sont recueillies 24 heures après l'infection par *Legionella pneumophila*. Elles sont comparées à celles obtenues chez des souris non infectées.



2. Évolution du nombre de bactéries dans les poumons et de la survie des souris témoin et des souris traitées après infection par *Legionella pneumophila*.

- À partir des documents présentés, expliquez le rôle joué par la protéine MIP2 lors de la réponse immunitaire faisant suite à une infection par *Legionella pneumophila*.

CHAPITRE 2

L'immunité adaptative

Les mécanismes de l'immunité innée sont parfois insuffisants pour permettre l'élimination d'un agent infectieux. Dans ce cas, un nouvelle phase de la réponse immunitaire se met en place : la réponse adaptative, qui est propre aux vertébrés.

Interactions entre une cellule dendritique (en gris) et un lymphocyte (en rose).
Cliché au MEB, fausses couleurs (x 5000).

Quelles sont les caractéristiques de la réponse immunitaire adaptative ?

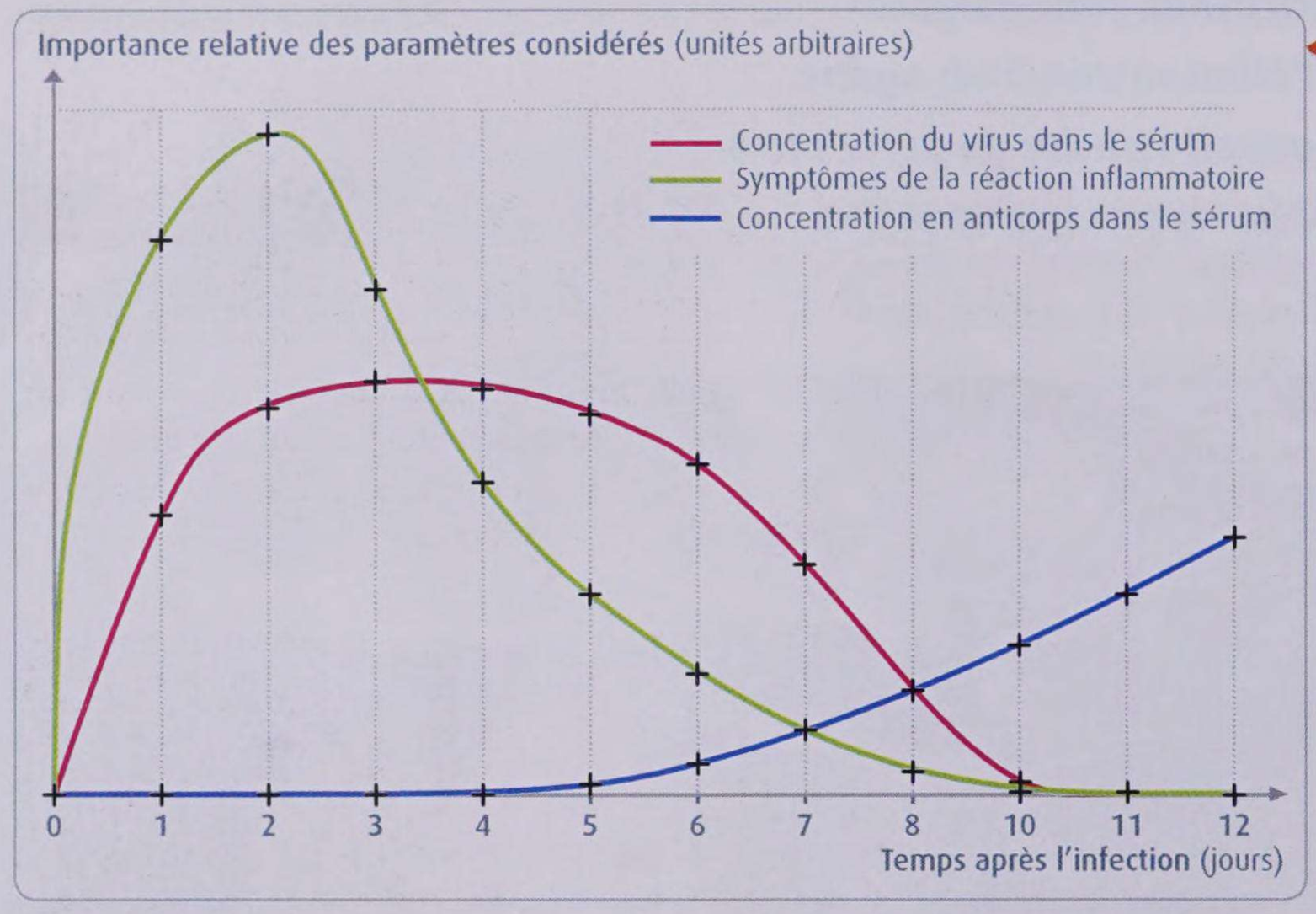
UNITÉ 1

La réponse adaptative humorale

La production d'anticorps est l'une des manifestations de la réponse immunitaire adaptative. On parle de réponse adaptative humorale.

Quelles sont les caractéristiques de la réponse adaptative humorale ?

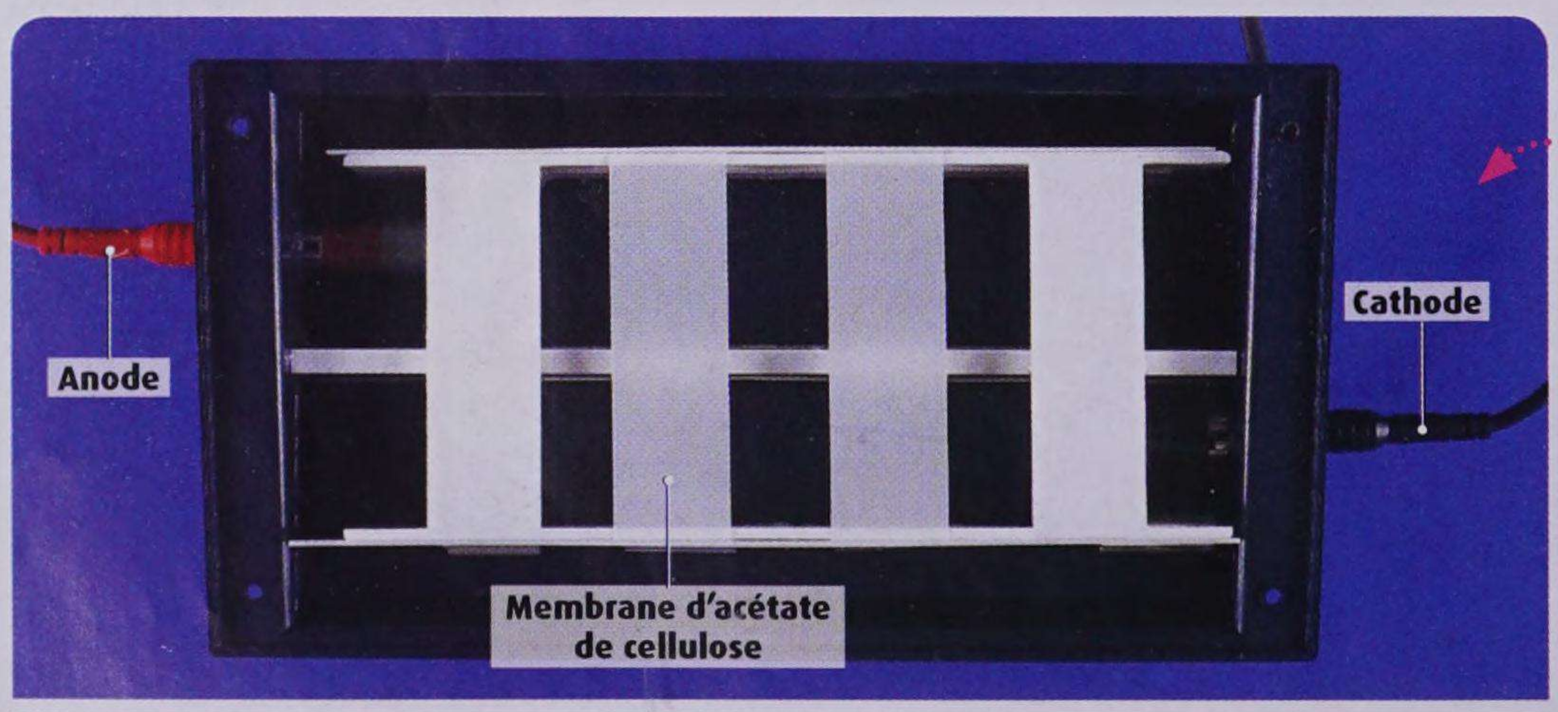
La production d'anticorps lors d'une infection

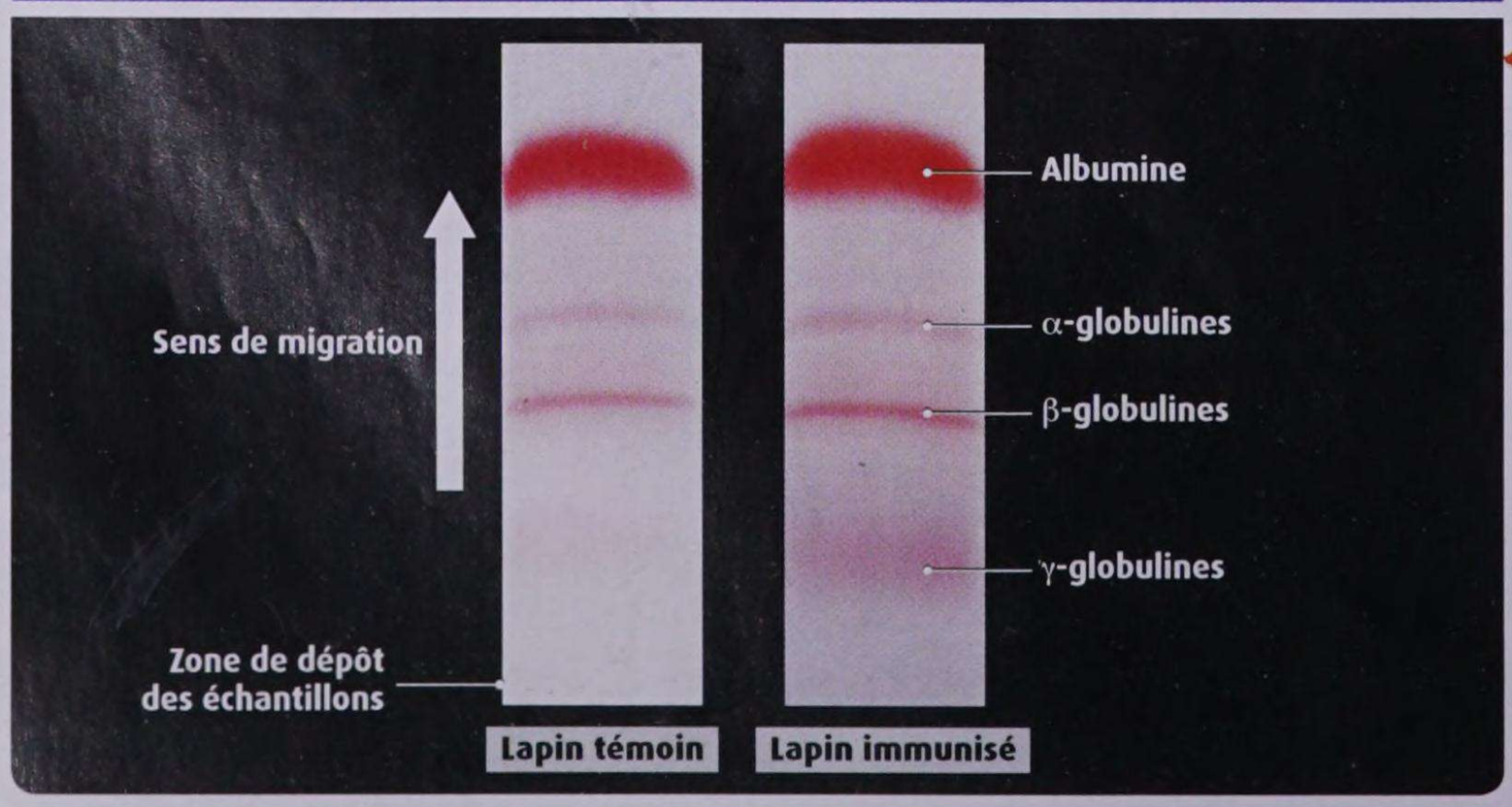


1 Suivi de quelques paramètres physiologiques au cours des 12 jours suivant une infection grippale. La grippe est une infection virale associée à une réaction inflammatoire au niveau de la muqueuse nasale et de la gorge. Hormis la fièvre, ses principaux symptômes sont un écoulement nasal abondant, des maux de gorge, des migraines, des nausées et des douleurs articulaires.

JE MANIPULE

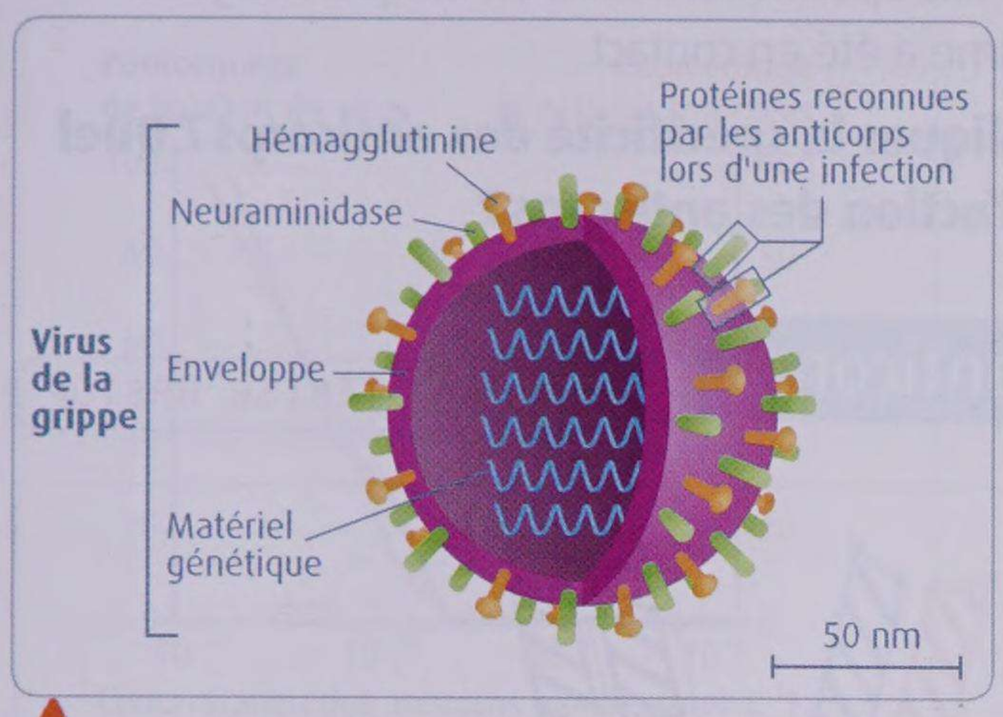
► Déposez chaque échantillon de sérum sur une membrane d'acétate de cellulose.
► Placez les deux membranes dans une cuve d'électrophorèse remplie de solution tampon.
► Branchez le générateur relié à la cuve pendant une heure. Sous l'action du champ électrique, les protéines de l'échantillon migrent vers l'anode sous forme de bandes. Leur vitesse de migration dépend de leur charge électrique et de leur taille.
► Visualisez les bandes par coloration au rouge ponceau.



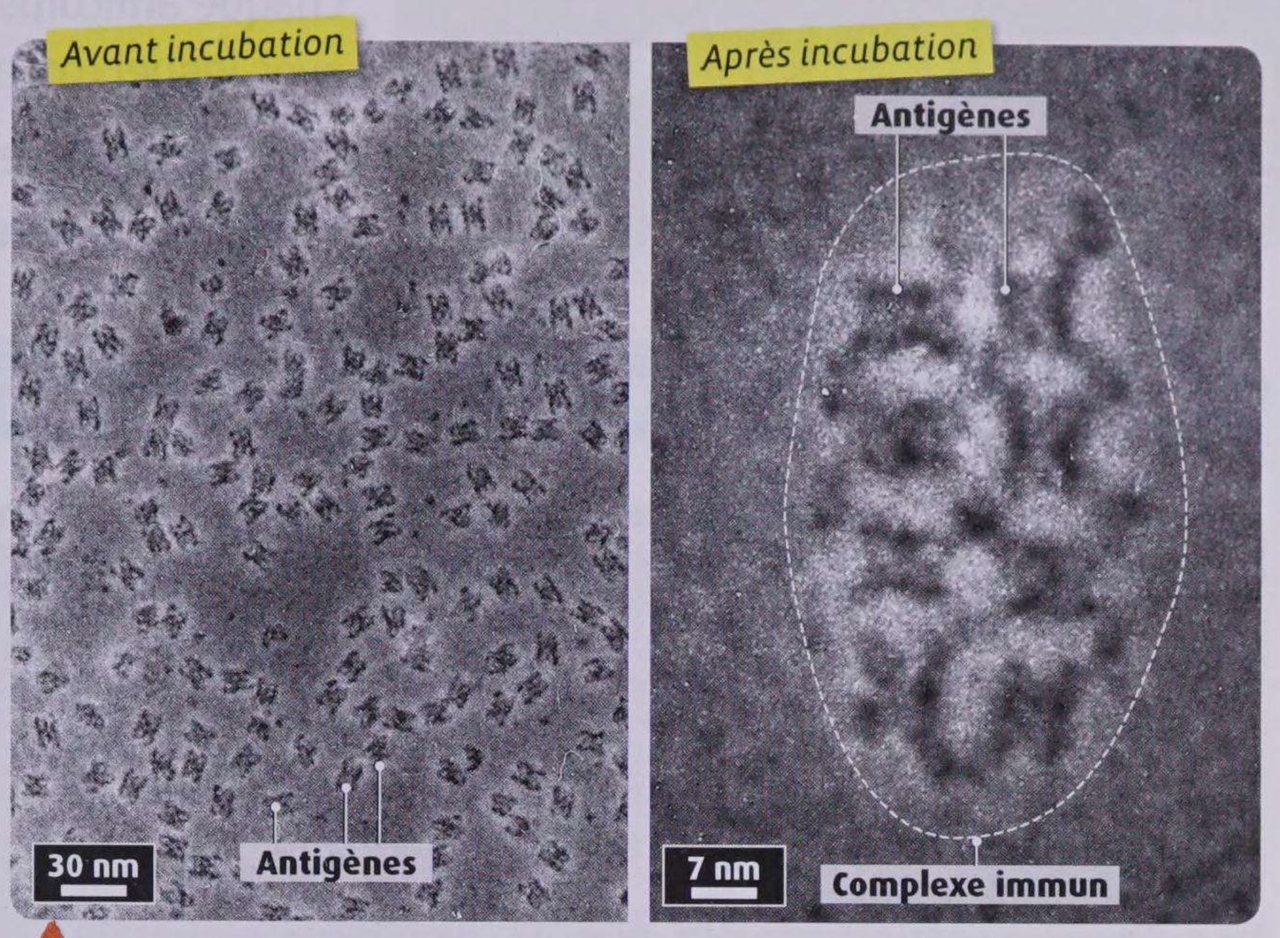


2 Étude du sérum de deux animaux par électrophorèse. On compare la composition du sérum (phase liquide du sang, débarrassé de ses cellules) d'un lapin témoin et d'un lapin ayant reçu, 8 jours auparavant, une injection d'une molécule étrangère (albumine de bœuf). L'électrophorèse permet de visualiser les principales protéines du sérum : albumine et globulines. L'étude du sérum d'un individu 8 jours après une infection par le virus de la grippe montre un résultat analogue à celui observé avec le lapin immunisé.

La spécificité des anticorps



3 Les cibles des anticorps produits lors d'une infection grippale. Une grande partie des anticorps produits lors d'une réponse adaptative anti-grippe se fixent sur les protéines de l'enveloppe virale, en particulier sur l'hémagglutinine. Aucune protéine de ce type n'est produite par les cellules de l'organisme infecté. Les molécules qui déclenchent une réponse immunitaire adaptative sont qualifiées d'antigènes.



4 Des molécules d'antigène avant et après incubation avec un anticorps (clichés au MET). Cet anticorps se fixe sur l'antigène étudié. On observe que l'anticorps agglutine les molécules d'antigène. La structure ainsi formée est qualifiée de complexe immun.

TP

5 L'analyse de la spécificité des anticorps grâce au test d'immunodiffusion sur gel (test d'Ouchterlony). On dispose de trois antigènes de nature protéique (protéines antigéniques) de structure proche : l'albumine de bœuf (B), l'ovalbumine (O), la lactalbumine (L). Elles sont introduites dans des puits creusés dans de la gélose et situés à égale distance d'un puits central contenant le sérum soit d'un lapin témoin, soit d'un lapin ayant reçu une injection d'albumine de bœuf 15 jours auparavant. Depuis leur puits, les molécules diffusent dans la gélose dans toutes les directions. La formation d'un complexe immun se traduit par l'apparition d'un précipité blanc en forme d'arc.

ACTIVITÉS

1 **DOC.1 ET 2.** Décrivez la cinétique de production des anticorps lors de la réponse adaptative anti-grippe et formulez une hypothèse quant à leur nature chimique.

2 **DOC. 3.** Indiquez les caractéristiques des antigènes reconnus par les anticorps lors de la réponse adaptative anti-grippe.

3 **DOC. 4 ET 5.** Précisez dans quelles conditions un arc de précipitation peut se former. Indiquez la propriété des anticorps qui est ainsi mise en évidence.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques de la réponse adaptative humorale contre la grippe et précisez les principales différences avec la réponse innée.

UNITÉ 2

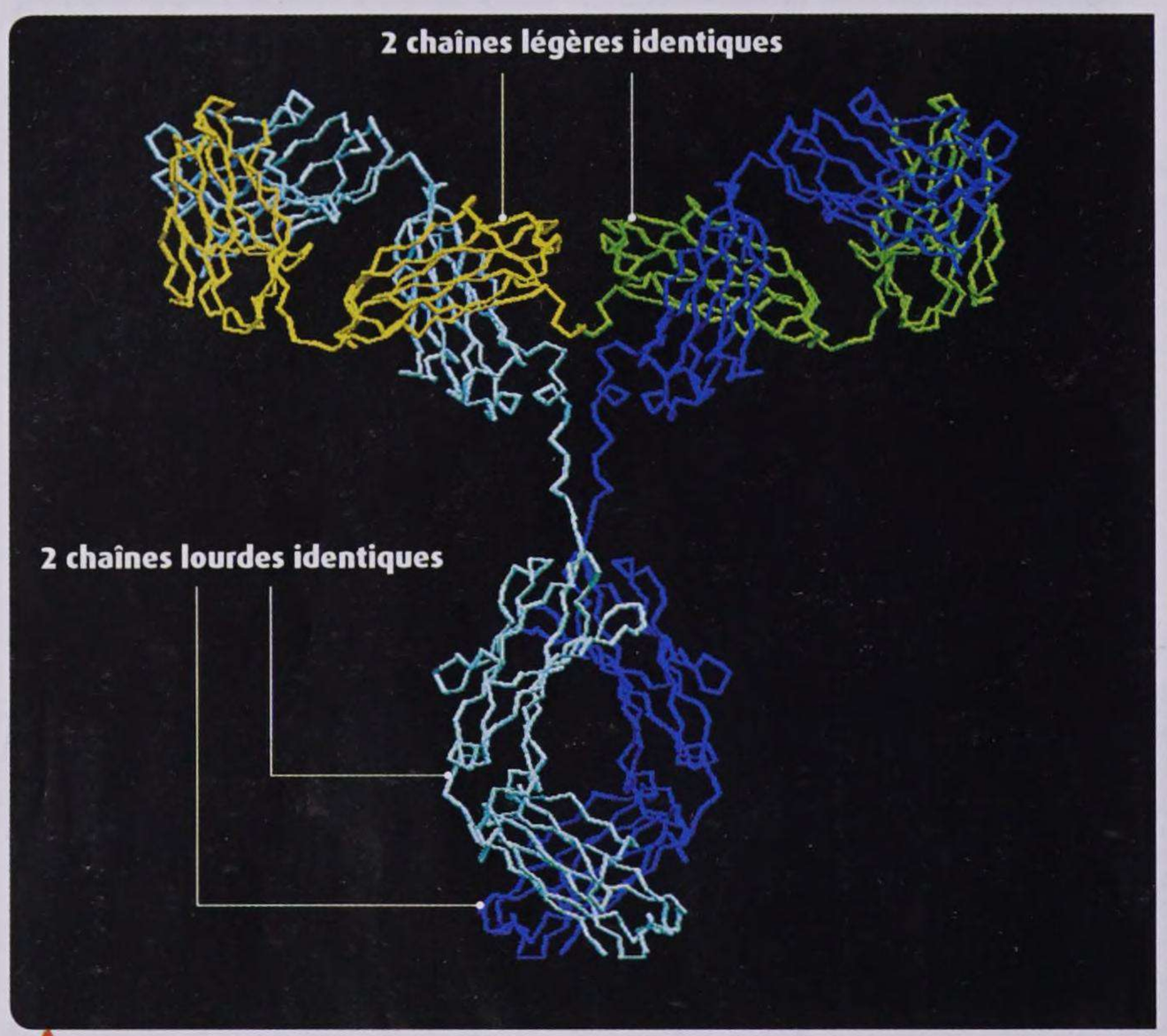
Le mode d'action des anticorps

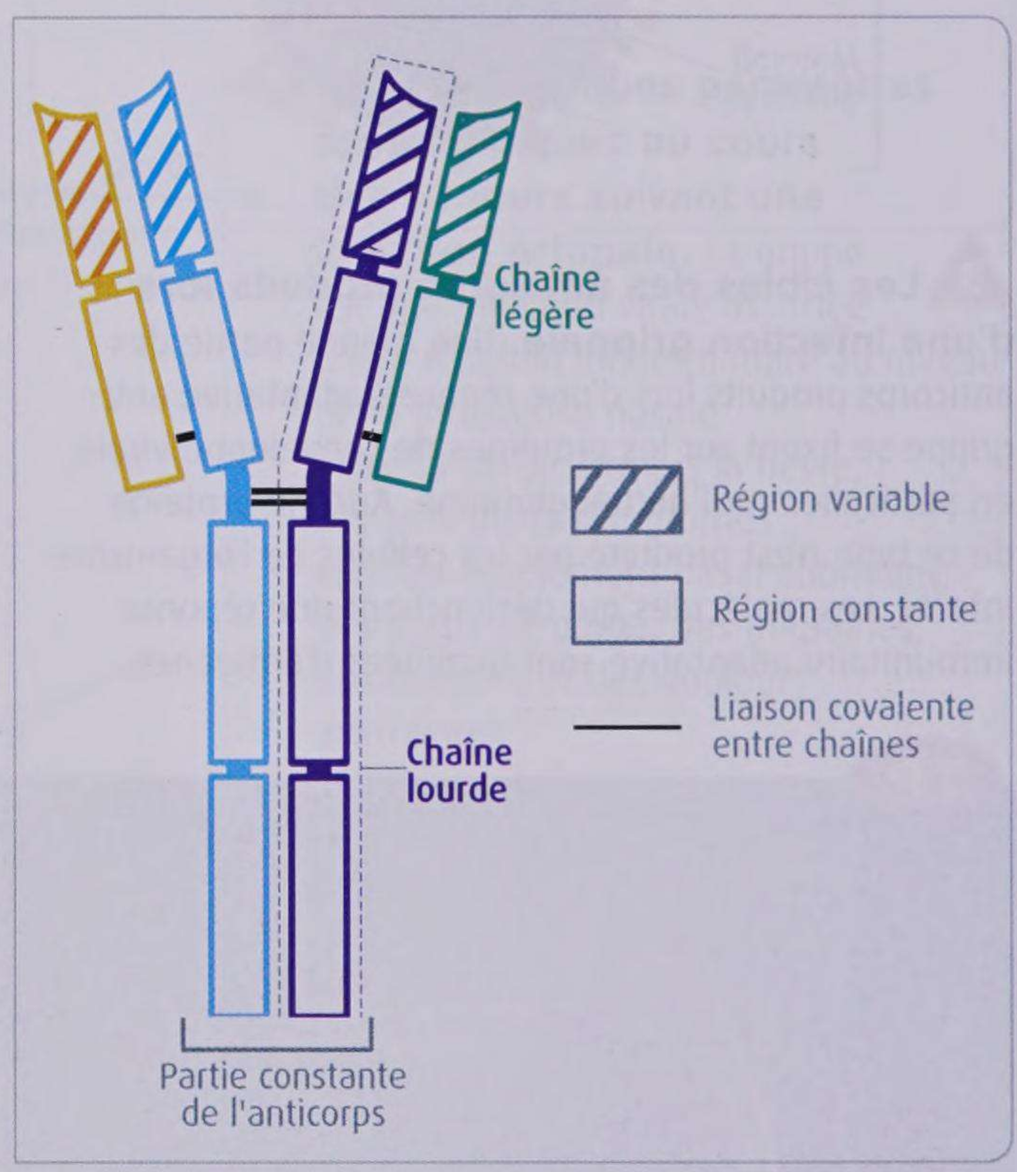
Lors d'une infection grippale, on observe la production d'anticorps reconnaissant des antigènes présents à la surface du virus. Chaque anticorps se fixe spécifiquement à un unique antigène avec lequel l'organisme a été en contact.

Comment expliquer la spécificité des anticorps ? Quel est le mode d'action des anticorps ?

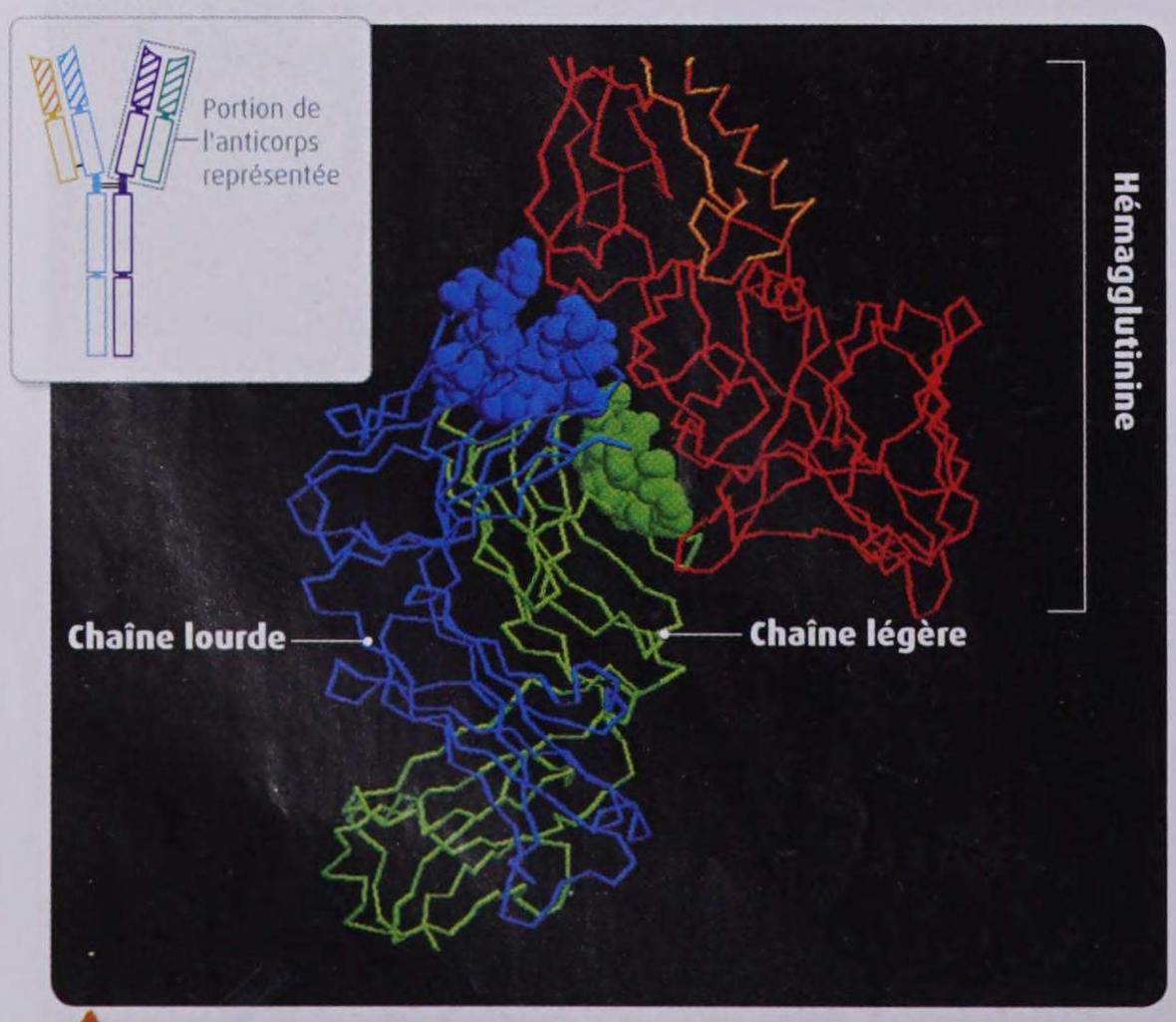
La reconnaissance d'un antigène par un anticorps

TP J'UTILISE RASTOP

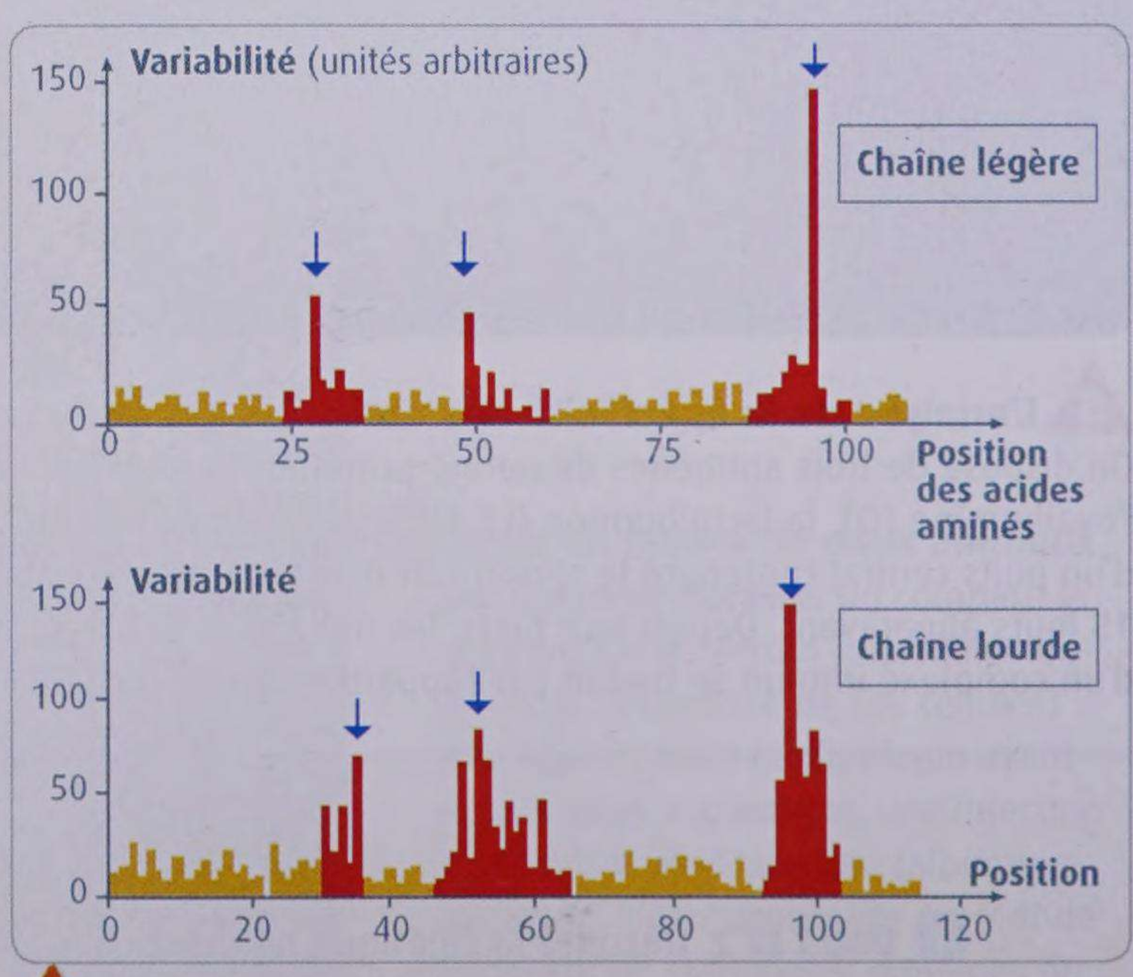




1 Structure tridimensionnelle d'un anticorps anti-hémagglutinine du virus de la grippe (image Rastop).
Au sein de chaque chaîne peptidique, on observe une région dite variable, dont la séquence en acides aminés diffère d'un anticorps à l'autre.

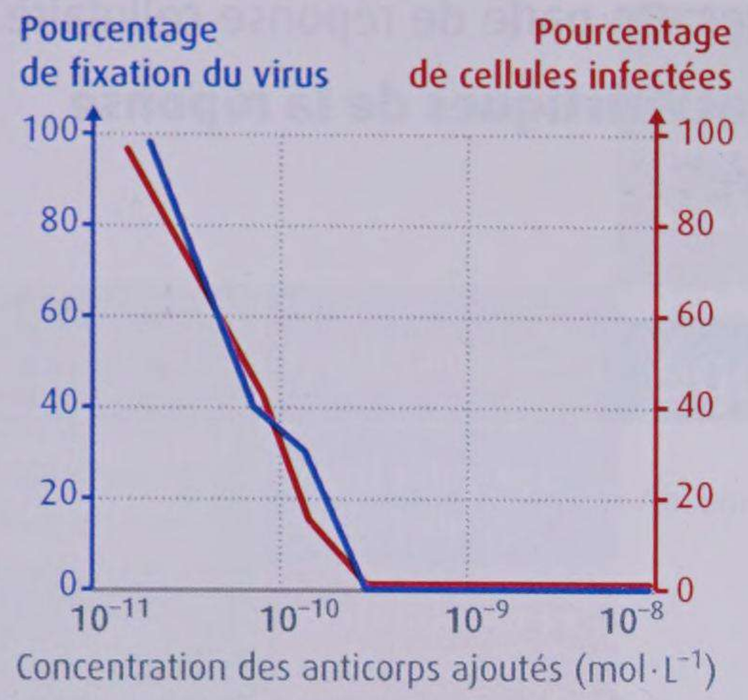


2 Structure d'un fragment de l'anticorps anti-hémagglutinine du virus de la grippe lié à l'hémagglutinine. Les acides aminés figurés sous forme de sphères sont ceux qui interagissent avec l'antigène. Seule une portion de l'hémagglutinine est représentée.

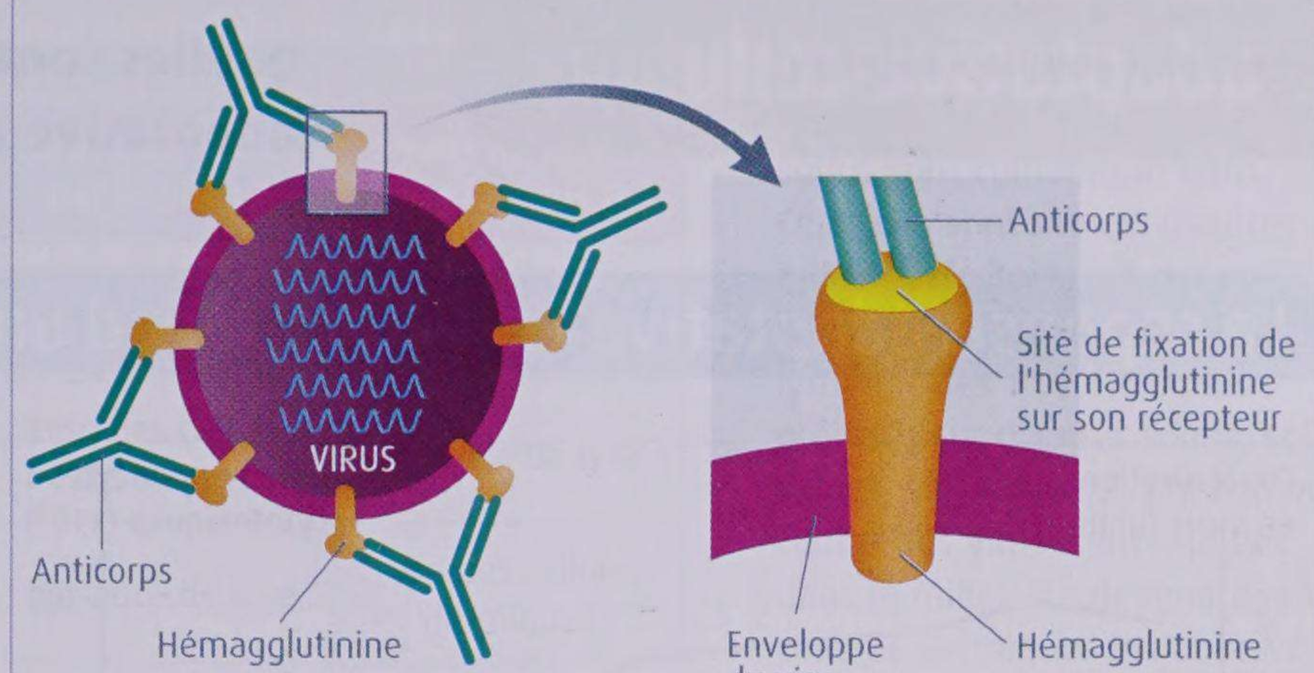


3 La variabilité des acides aminés des régions variables. La région variable d'anticorps de spécificité différente a été séquencée. Ces graphiques traduisent la variabilité de chaque acide aminé d'un anticorps à l'autre. Les flèches pointent les acides aminés figurés sous forme de sphères dans le doc. 2 ci-contre.

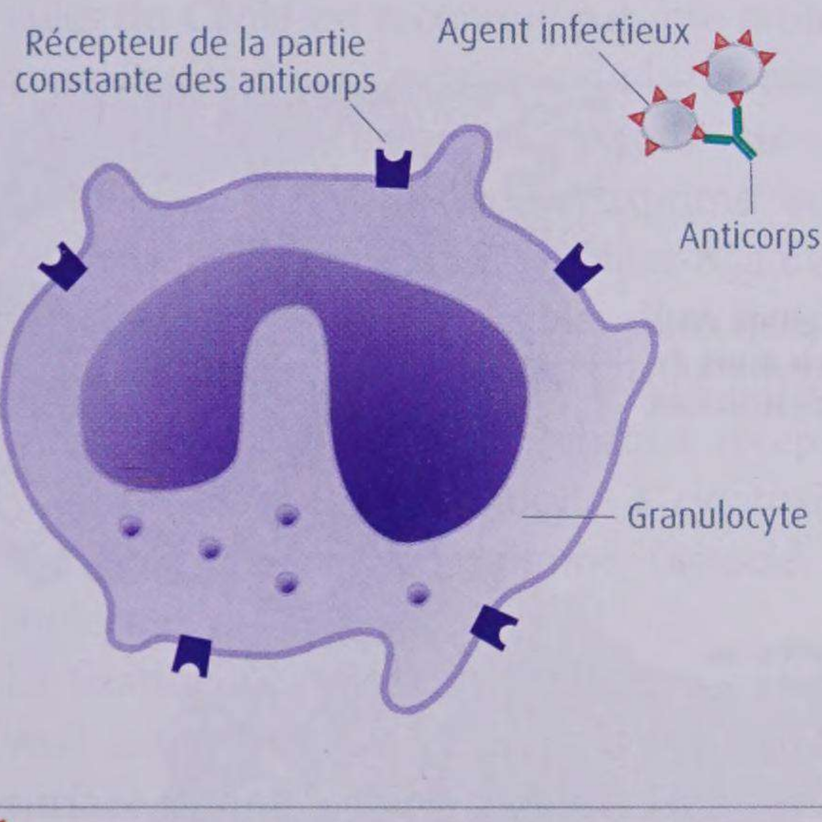
L'action des anticorps sur les agents infectieux



4 Étude de l'action d'un anticorps anti-hémagglutinine. En présence de concentrations croissantes d'un anticorps anti-hémagglutinine produit lors d'une infection grippale, on mesure le taux de fixation du virus de la grippe sur des cellules en culture et le taux d'infection de ces cellules. Les résultats sont exprimés en pourcentage du taux de liaison ou d'infection observé en l'absence d'anticorps.



5 Le complexe formé par des anticorps anti-hémagglutinine et l'hémagglutinine à la surface du virus de la grippe. L'anticorps est celui qui a été étudié doc. 4. Les portions de l'hémagglutinine représentées en jaune se fixent sur un récepteur présent à la surface de la membrane plasmique des cellules cibles du virus. Cette fixation est indispensable à l'infection de ces cellules par le virus.



6 Des récepteurs de la partie constante des anticorps. Les macrophages et les granulocytes possèdent des récepteurs qui se fixent sur la partie constante des anticorps. Ces récepteurs augmentent l'efficacité de la phagocytose de l'agent infectieux lors de la réponse adaptative.

7 Un ver parasite attaqué par des granulocytes (cliché au MEB, fausses couleurs). Ces cellules immunitaires sécrètent des enzymes permettant la destruction des agents infectieux qui, à l'image de ce ver, sont trop gros pour être phagocytés. Des anticorps sont fixés sur certains antigènes présents à la surface du ver.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Précisez combien de molécules d'antigène peuvent être fixées par un même anticorps.

2 **DOC. 2 ET 3.** Formulez une hypothèse pour expliquer la spécificité de l'anticorps vis-à-vis d'un unique antigène.

3 **DOC. 4 ET 5.** Expliquez comment les anticorps permettent de lutter contre l'infection grippale.

4 **DOC. 6 ET 7.** Expliquez en quoi les anticorps peuvent favoriser la destruction des agents infectieux quelle que soit leur taille. En quoi cela témoigne-t-il d'une complémentarité des réponses innée et adaptative ?

5 **EN CONCLUSION.** Montrez que la structure des anticorps permet d'expliquer leur spécificité et leurs différentes fonctions.

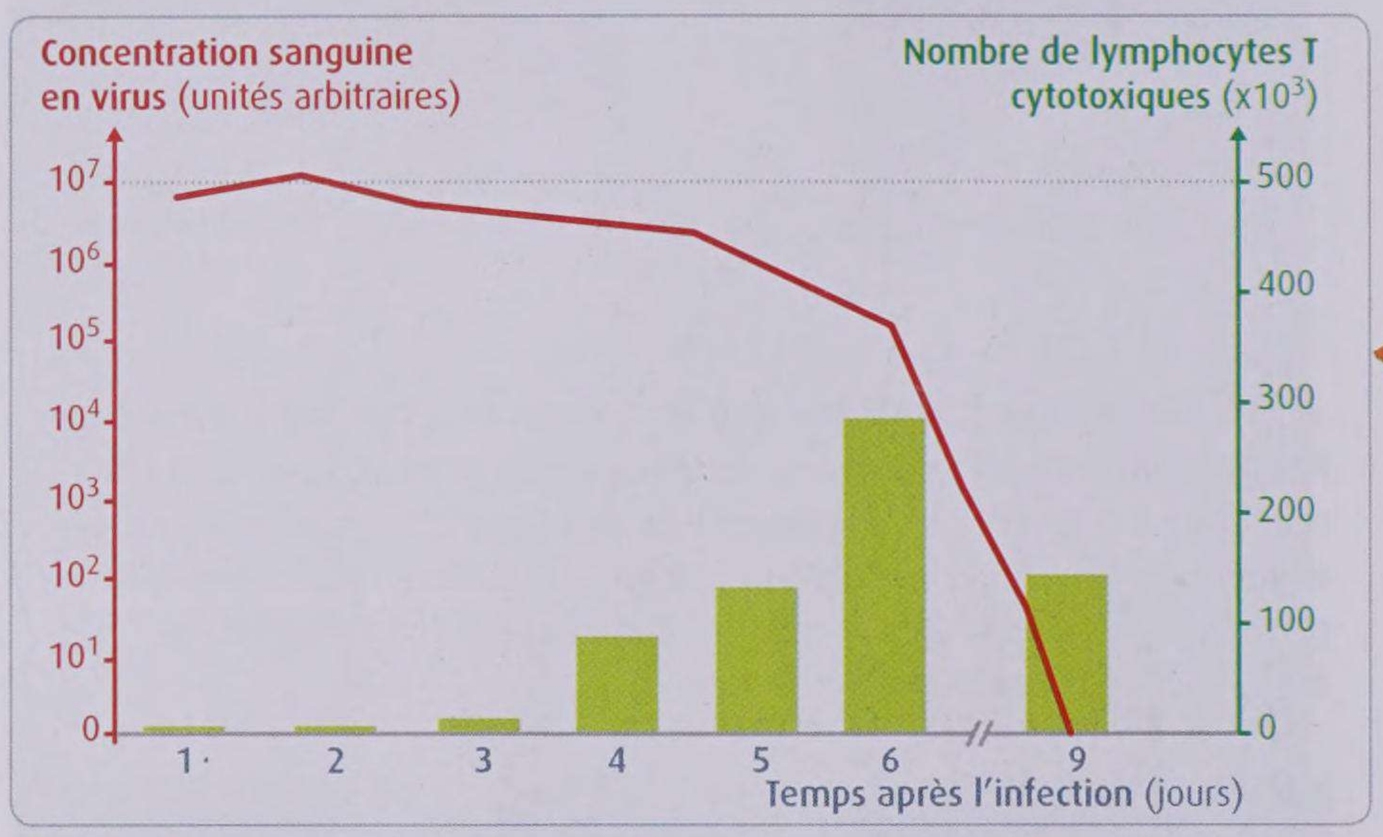
UNITÉ 3

La réponse adaptative cellulaire

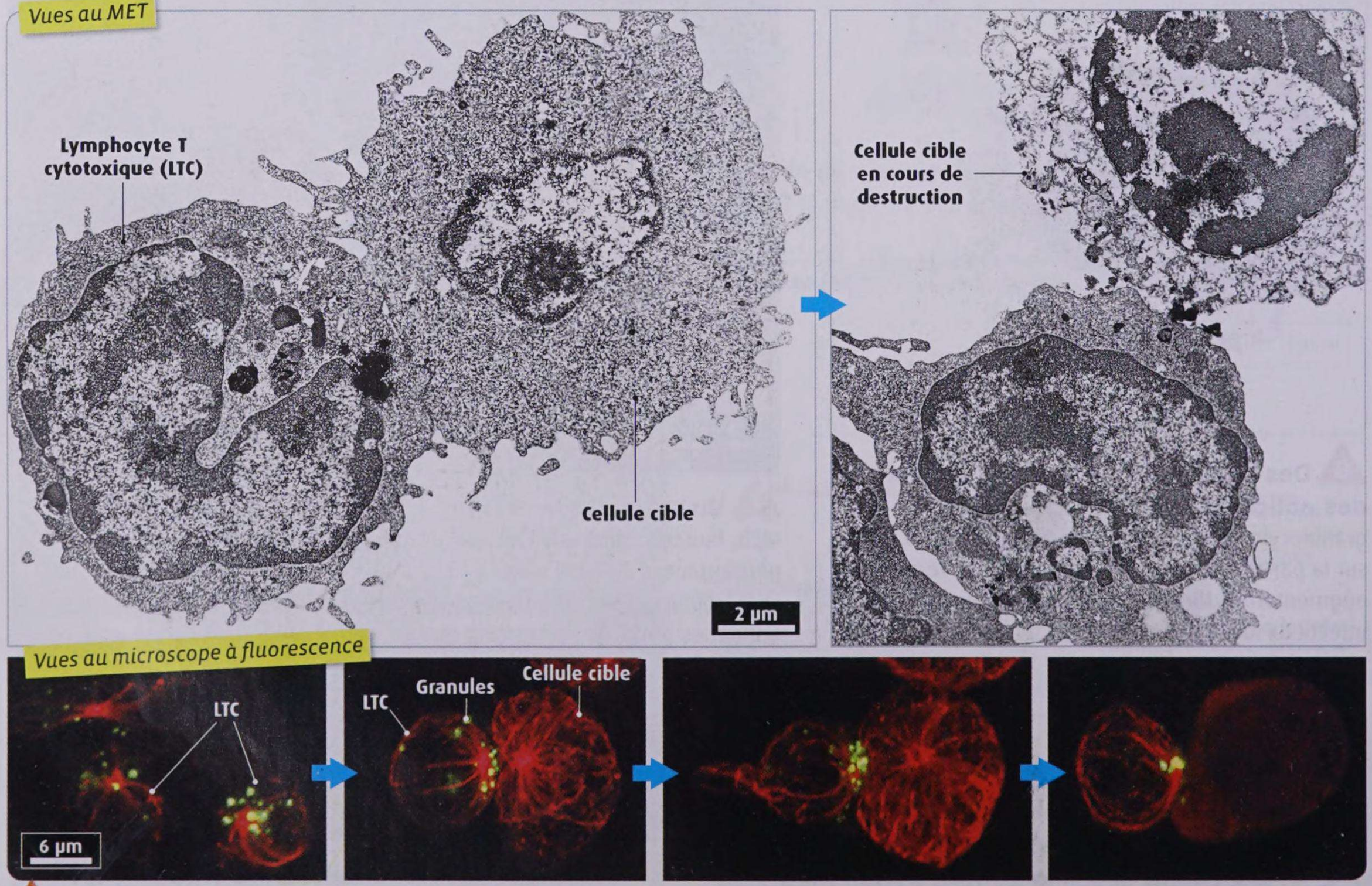
Les anticorps peuvent empêcher un virus d'infecter une cellule. Mais pour les cellules déjà infectées, ce sont d'autres acteurs de l'immunité adaptative qui entrent en action : les lymphocytes T cytotoxiques. On parle de réponse cellulaire.

Quelles sont les caractéristiques de la réponse adaptative cellulaire ?

La réponse adaptative cellulaire lors d'une grippe



1 La production de lymphocytes T cytotoxiques lors d'une infection grippale. Chez des souris infectées par le virus de la grippe, on mesure l'évolution au cours du temps du nombre de lymphocytes T cytotoxiques dans les poumons et de la concentration sanguine en virus. Les lymphocytes T cytotoxiques recueillis peuvent détruire des cellules infectées par le virus de la grippe.



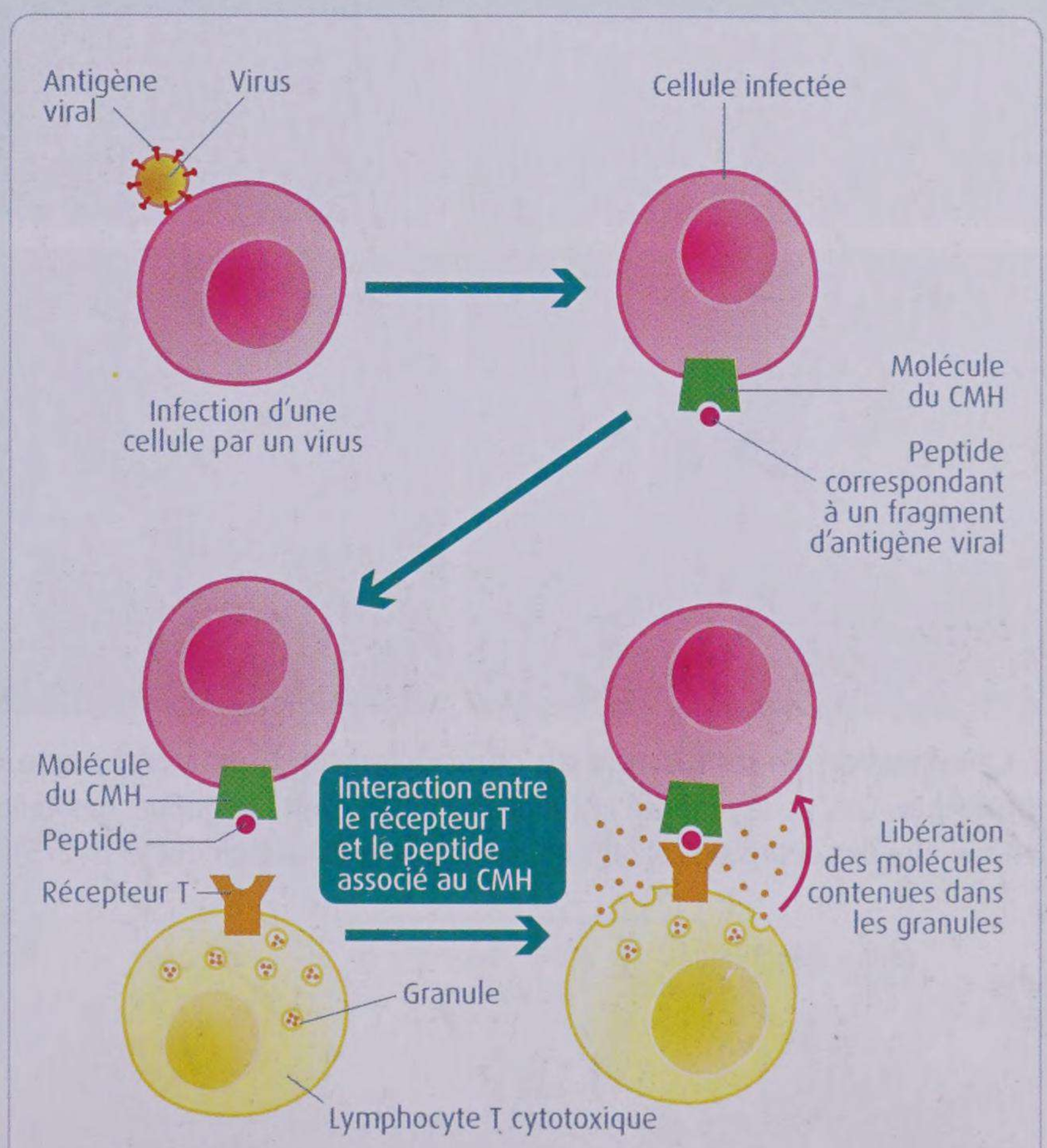
2 Les étapes des interactions entre un lymphocyte T cytotoxique et une cellule infectée. Les granules (marqués par un colorant fluorescent vert dans les images du bas) contiennent des protéines (les perforines) qui peuvent s'insérer dans la membrane plasmique de la cellule infectée et former un pore, ainsi que des enzymes (les granzymes) capables de digérer les protéines. Leur contenu est libéré dans l'espace qui sépare les membranes plasmiques des cellules accolées.

La spécificité des lymphocytes T cytotoxiques

Provenance des lymphocytes T cytotoxiques	Provenance des cellules dermiques : Souris saines	Souris infectées par le virus A	Souris infectées par le virus B
Souris saines	Absence de lyse	Absence de lyse	Absence de lyse
Souris infectées par le virus A		Lyse des cellules dermiques	Absence de lyse
Souris infectées par le virus B		Absence de lyse	Lyse des cellules dermiques

3 Étude des conditions de lyse des cellules infectées.
Des cellules dermiques de souris sont cultivées *in vitro*. Certaines sont saines. D'autres ont été infectées soit par un virus A, soit par un virus B. Des lymphocytes T cytotoxiques prélevés sur d'autres souris, soit saines, soit infectées par l'un ou l'autre des virus, sont rajoutés dans le milieu. Le devenir des cellules dermiques est observé.

Toutes les cellules de l'organisme expriment sur leur membrane plasmique des molécules du CMH (voir doc. 5 p. 275). Lorsqu'une cellule est infectée par un virus, ces molécules sont associées à des peptides qui correspondent à des fragments d'antigènes du virus. Cette association entre les antigènes du virus et les molécules du CMH est reconnue par une protéine appelée récepteur T, exprimée sur la membrane plasmique des lymphocytes T cytotoxiques. Un lymphocyte T cytotoxique n'exprime qu'un seul type de récepteur T. Certaines régions de ce récepteur sont très variables d'un lymphocyte à l'autre. Les récepteurs T sont ainsi des molécules très spécifiques : chaque récepteur T exprimé par un lymphocyte T cytotoxique reconnaît un antigène donné (associé aux molécules du CMH) et un seul.
La fixation du récepteur T sur un antigène viral associé aux molécules du CMH à la surface d'une cellule infectée entraîne la libération des molécules contenues dans les granules du lymphocyte.



4 La reconnaissance d'une cellule infectée par un lymphocyte T cytotoxique.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Caractérisez les conditions de production des lymphocytes T cytotoxiques lors de la réponse adaptative anti-grippe.
2 **DOC. 2.** Proposez une chronologie des événements qui conduisent à la lyse d'une cellule infectée par un lymphocyte T cytotoxique.
3 **DOC. 3.** Montrez que les lymphocytes T cytotoxiques produits lors d'une réponse cellulaire sont spécifiques du virus ayant infecté l'organisme.
4 **DOC. 4.** Proposez une explication aux résultats observés doc. 3.
5 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques de la réponse adaptative cellulaire contre la grippe et précisez les principales différences avec la réponse innée.

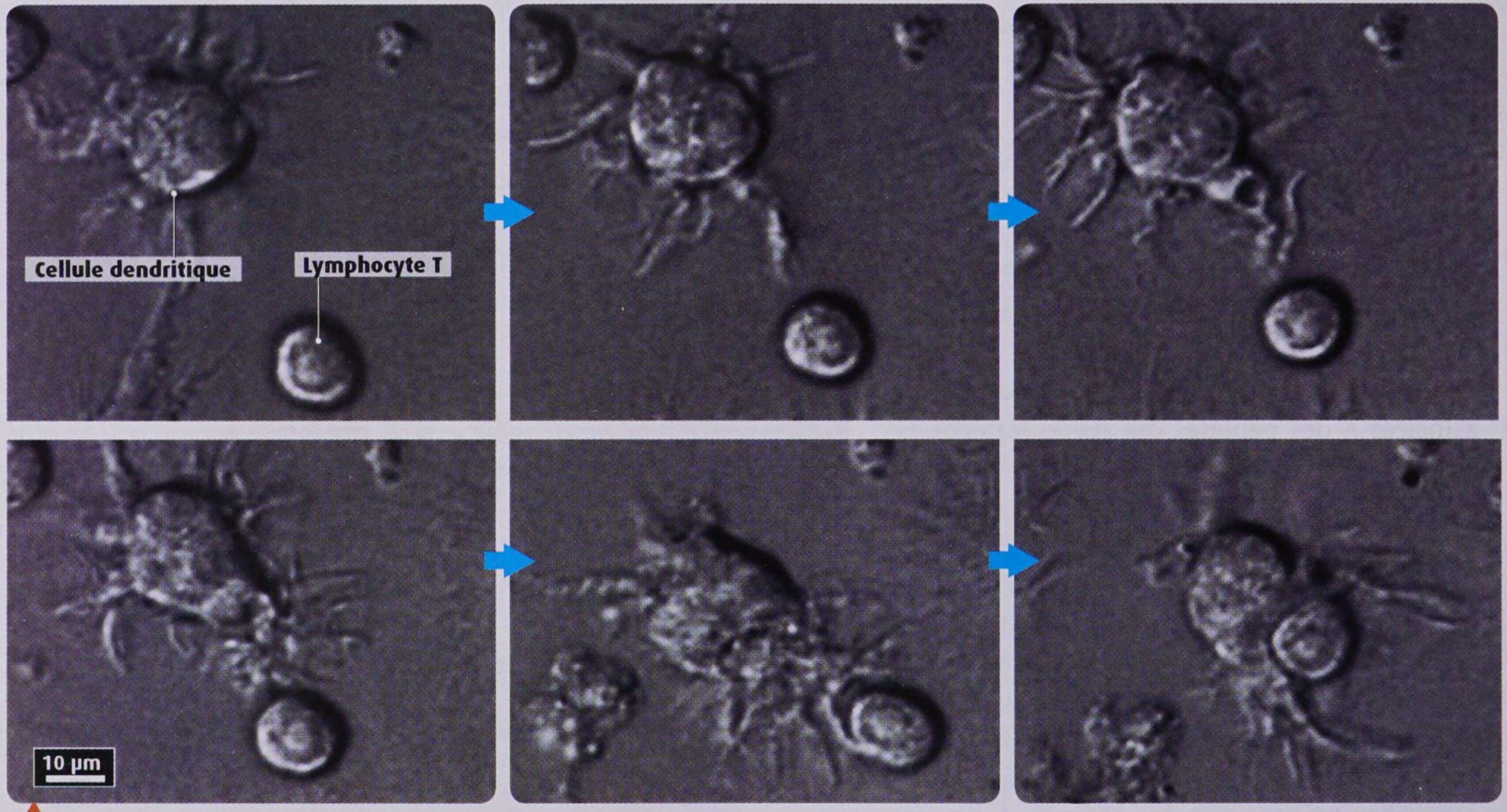
UNITÉ 4

L'origine des anticorps

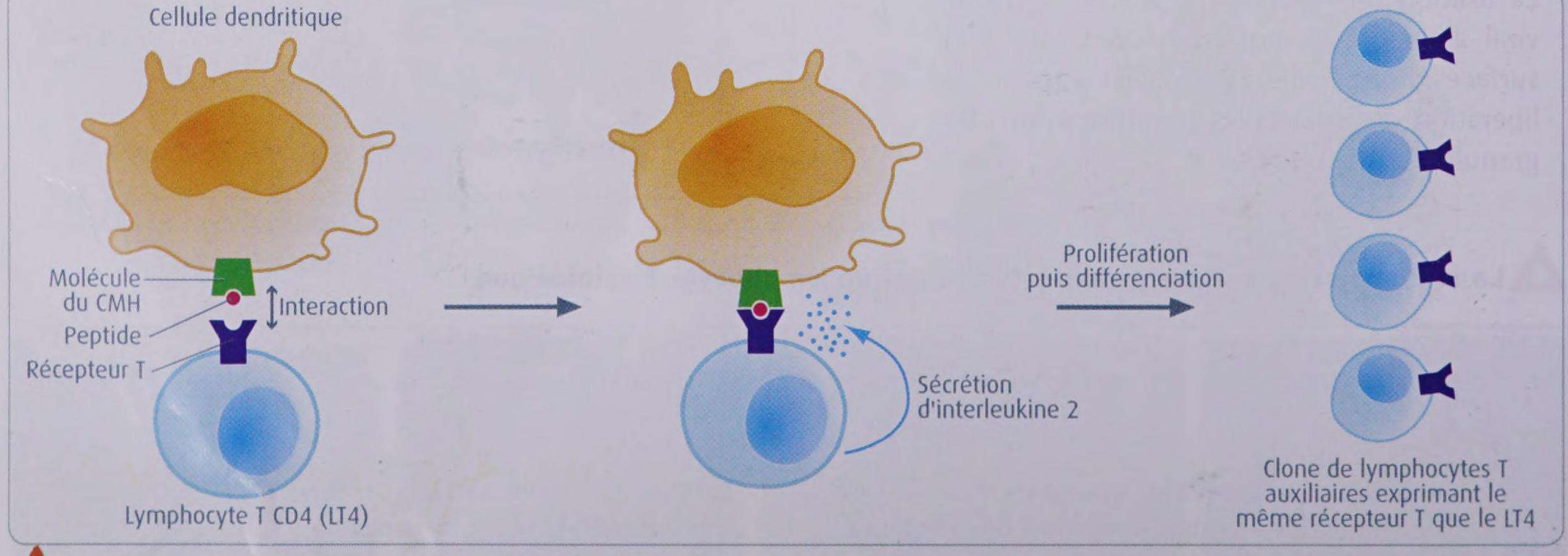
Les anticorps produits par l'organisme lors d'une infection grippale se fixent spécifiquement sur les protéines antigéniques de l'enveloppe du virus.

Quels mécanismes permettent la production d'anticorps spécifiques de l'agent infectieux à l'origine de la réponse immunitaire ?

Le rôle des cellules dendritiques

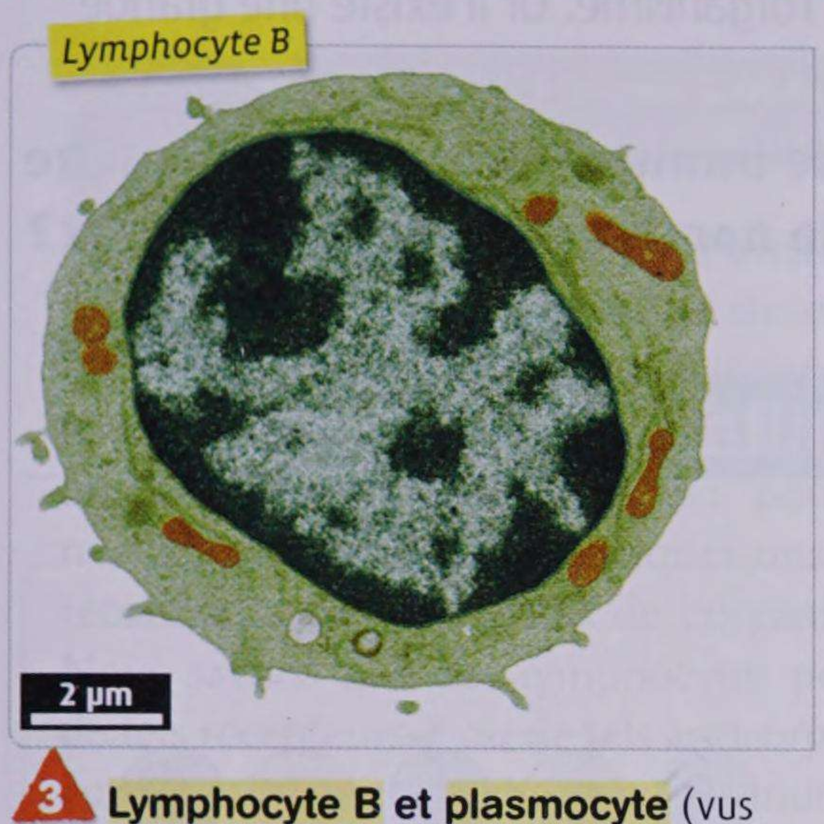


1 Observation en temps réel du comportement d'un lymphocyte T et d'une cellule dendritique dans un ganglion lymphatique. Lors de la réponse immunitaire innée contre la grippe, des cellules dendritiques phagocytent, sur le site de la réaction inflammatoire, des débris de cellules infectées par le virus (voir doc. 5 p. 275), puis migrent vers le ganglion lymphatique le plus proche.

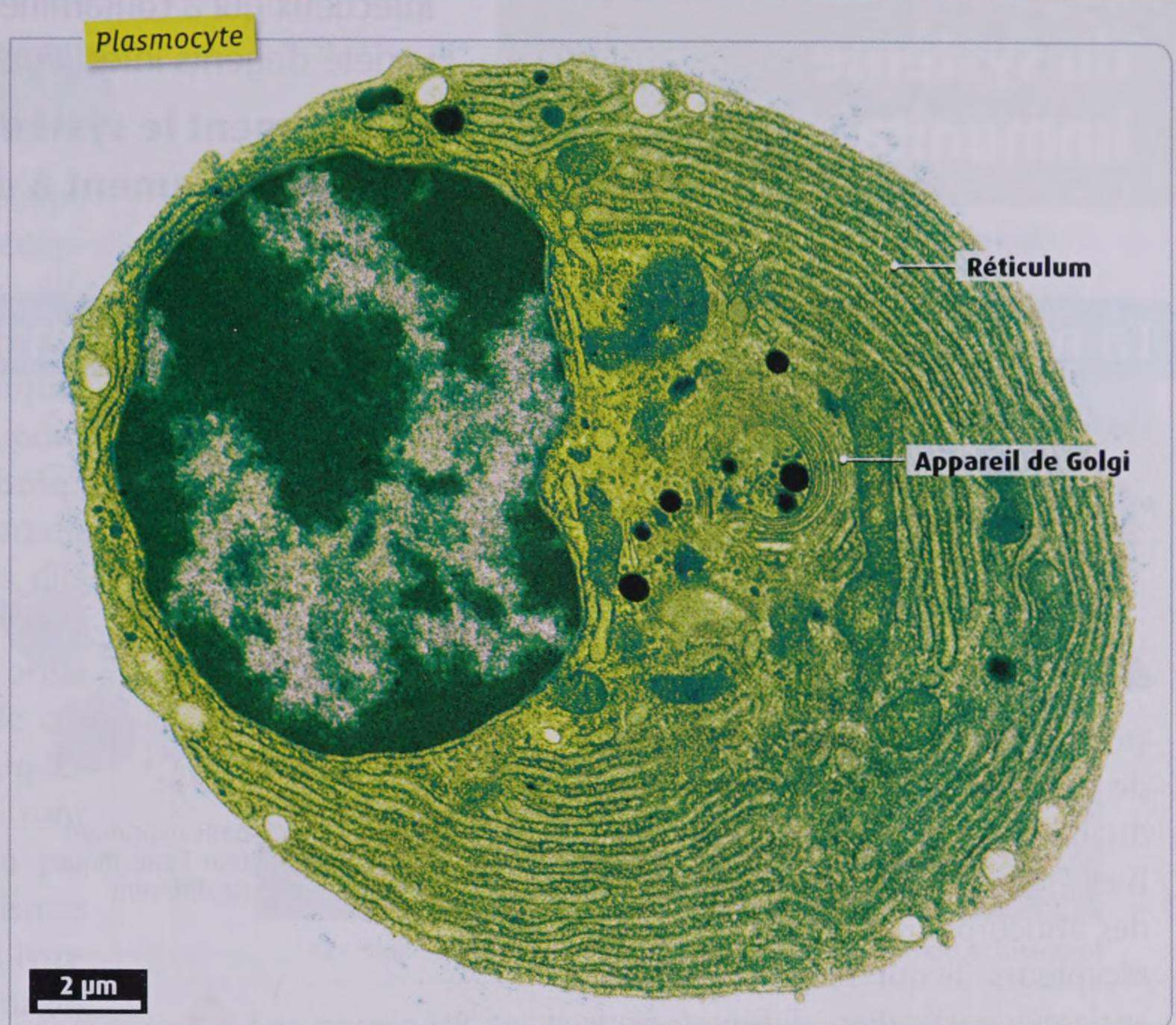


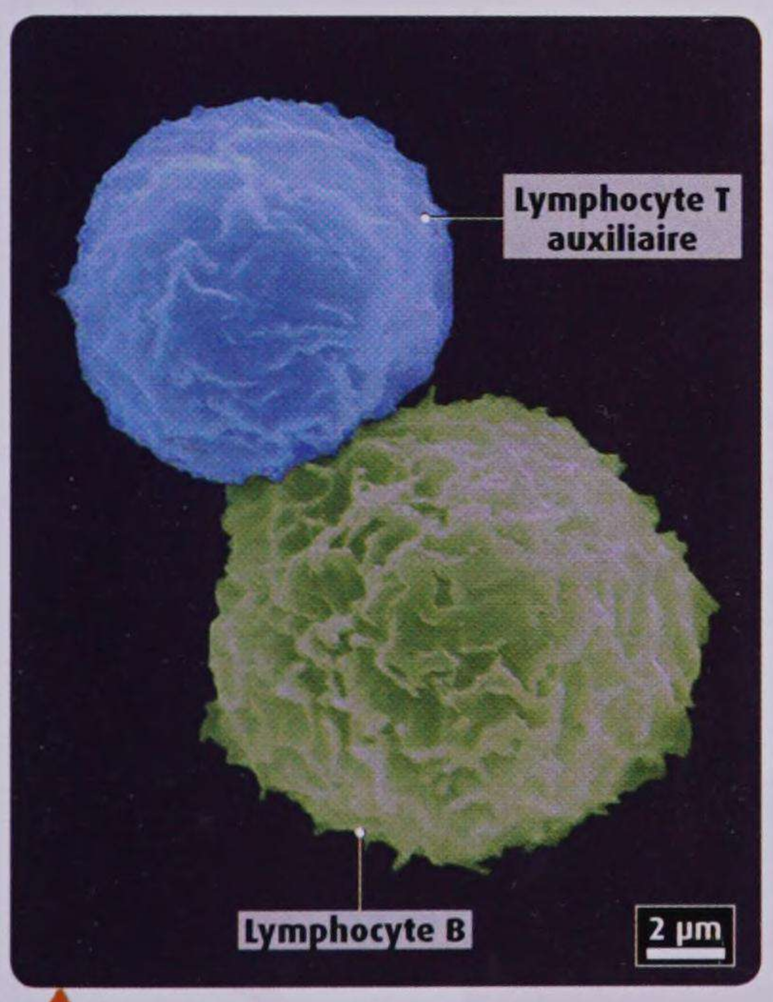
2 Les conséquences du contact entre un lymphocyte T CD4 et une cellule dendritique. Les lymphocytes T CD4 (LT4) sont des cellules immunitaires localisées, entre autres, dans les ganglions lymphatiques. Chacun d'eux exprime sur sa membrane un seul type de récepteur T. Lorsqu'un LT4 porte un récepteur T capable de reconnaître un peptide associé aux molécules du CMH exprimées par une cellule dendritique, les deux cellules interagissent : les cellules dendritiques jouent le rôle de cellules présentatrices de l'antigène pour le lymphocyte T. L'interleukine 2 est une molécule soluble qui agit sur la prolifération et la différenciation du LT4.

Le rôle des lymphocytes T auxiliaires

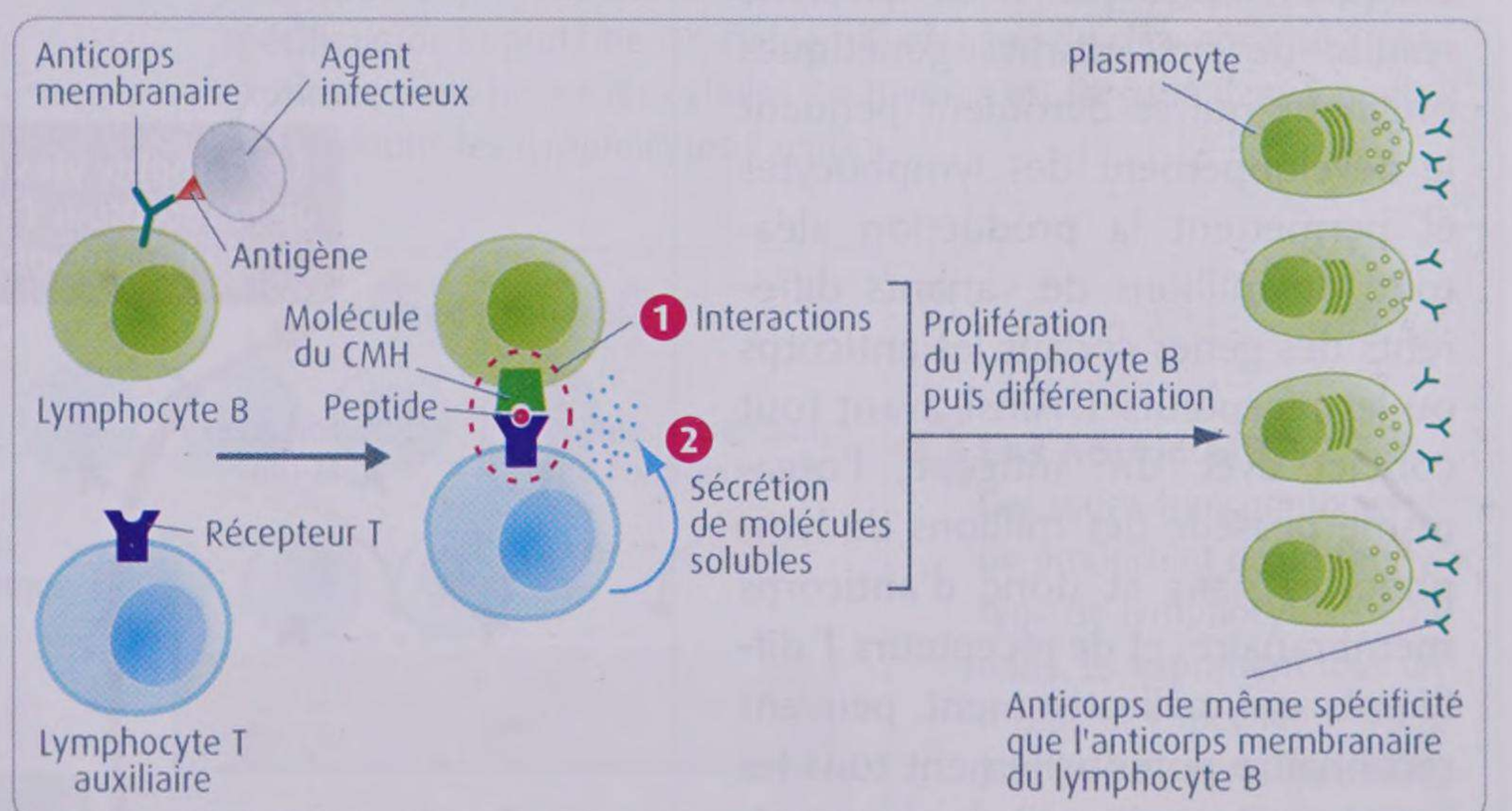


3 Lymphocyte B et plasmocyte (vus au MET, fausses couleurs). Les lymphocytes B sont localisés, entre autres, dans les ganglions lymphatiques. Chaque lymphocyte B exprime sur sa membrane plasmique des anticorps d'une spécificité donnée ; ces anticorps ne sont pas sécrétés. Les plasmocytes sont des cellules sécrétrices d'anticorps. Elles sont très riches en organites permettant la synthèse protéique (réticulum et appareil de Golgi).





4 Deux lymphocytes dans un ganglion lymphatique (vus au MEB, fausses couleurs).



5 Les conséquences du contact entre un lymphocyte B et un lymphocyte T auxiliaire. Lorsque l'anticorps membranaire d'un lymphocyte B se fixe à un antigène d'un agent infectieux, ce dernier est phagocyté. Le lymphocyte B exprime alors sur la membrane plasmique un peptide issu de la digestion de l'antigène associé aux molécules du CMH. Cette association peut être reconnue par un lymphocyte T auxiliaire portant un récepteur T spécifique.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À l'aide des documents proposés et de vos connaissances sur la réponse innée, proposez, sous la forme d'un schéma, une chronologie des événements allant de la réponse innée jusqu'à la production d'anticorps spécifiques lors d'une infection grippale.

Pour cela, vous pouvez :
- déterminer l'origine, les caractéristiques et le rôle des cellules dendritiques lors de la réponse immunitaire contre la grippe **(DOC. 1 ET 2)**.
- montrer que les lymphocytes T auxiliaires peuvent être à l'origine d'une production d'anticorps spécifiques du virus de la grippe **(DOC. 2 À 5)**.

UNITÉ 5

La maturation du système immunitaire

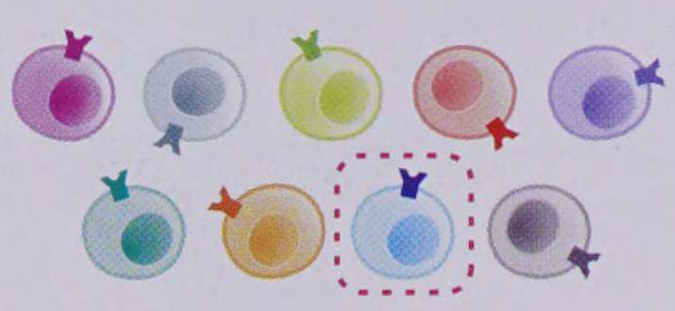
Les anticorps et les lymphocytes T cytotoxiques produits lors d'une réponse immunitaire reconnaissent spécifiquement l'agent infectieux qui a contaminé l'organisme. Or il existe une grande variété d'agents infectieux.

Comment le système immunitaire peut-il répondre spécifiquement à de nombreux agents infectieux ?

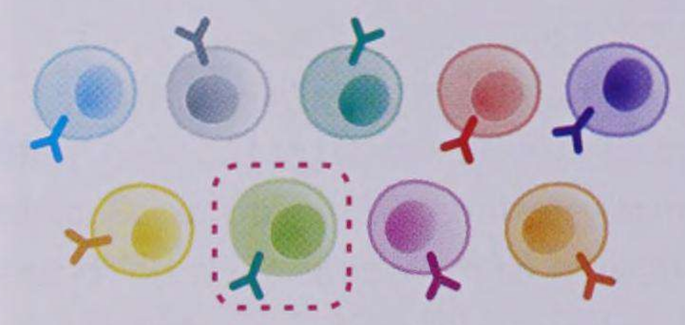
La production et la sélection des cellules immunitaires

Interview de **Françoise Salvadori**, chercheuse en immunologie

Chaque jour, les organes lymphoïdes primaires d'un individu (voir **rabat de couverture**) produisent plusieurs dizaines de millions de lymphocytes B et T dits naïfs. Chacun d'eux porte des anticorps membranaires ou des récepteurs T qui reconnaissent un antigène particulier, différent pour chaque lymphocyte. Cette diversité résulte de mécanismes génétiques originaux qui se déroulent pendant le développement des lymphocytes et permettent la production aléatoire de millions de variants différents des gènes codant les anticorps ou les récepteurs T. Ainsi, avant tout contact avec un antigène, l'organisme possède des millions de lymphocytes naïfs et donc d'anticorps membranaires et de récepteurs T différents qui, collectivement, peuvent reconnaître potentiellement tous les antigènes. Lors d'une infection, seuls les lymphocytes naïfs rencontrant un antigène auquel se lie leur anticorps membranaire ou leur récepteur T prolifèrent puis se différencient en un clone de cellules effectrices : les lymphocyte B en plasmocytes, les lymphocytes T CD4 en lymphocytes T auxiliaires et les lymphocytes T CD8 en lymphocytes T cytotoxiques. On parle de sélection clonale. Les lymphocytes naïfs qui ne rencontrent pas « leur » antigène meurent au bout de quelques semaines.



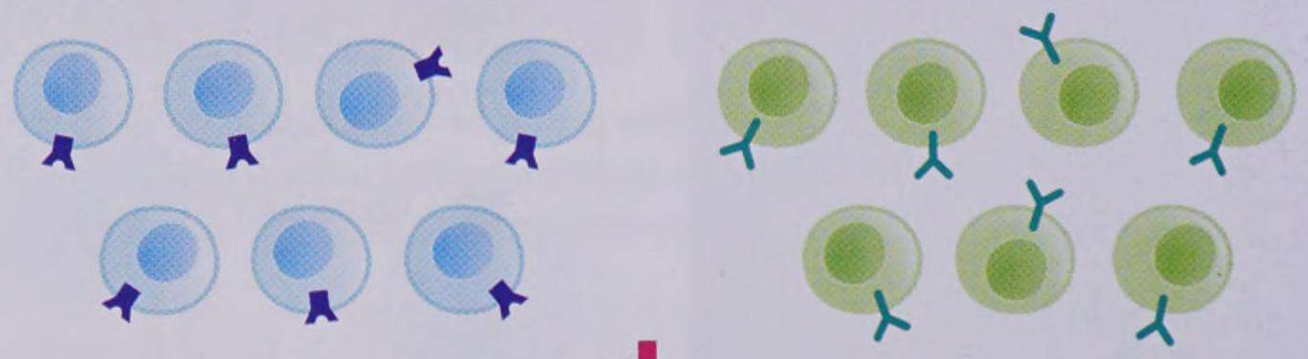
Lymphocytes T naïfs exprimant chacun un récepteur T spécifique d'un antigène différent



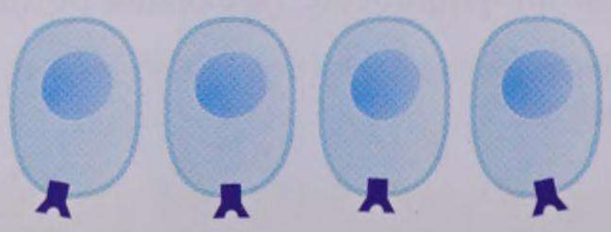
Lymphocytes B naïfs exprimant chacun un anticorps membranaire spécifique d'un antigène différent

Contamination de l'organisme par un agent infectieux

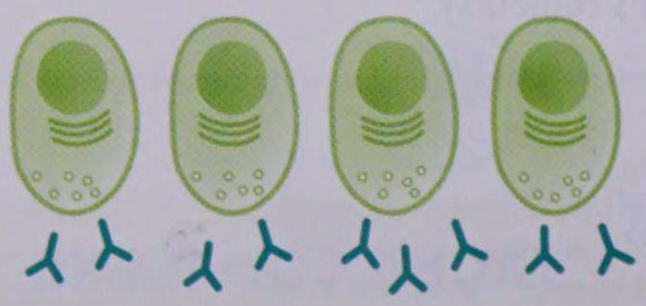
Les lymphocytes naïfs dont l'anticorps ou le récepteur T reconnait un antigène de l'agent infectieux prolifèrent



Les cellules issues de la prolifération se différencient en cellules effectrices



Clone de lymphocytes T auxiliaires ou cytotoxiques dont le récepteur reconnait spécifiquement un antigène de l'agent infectieux



Clone de plasmocytes sécrétant un anticorps reconnaissant spécifiquement un antigène de l'agent infectieux

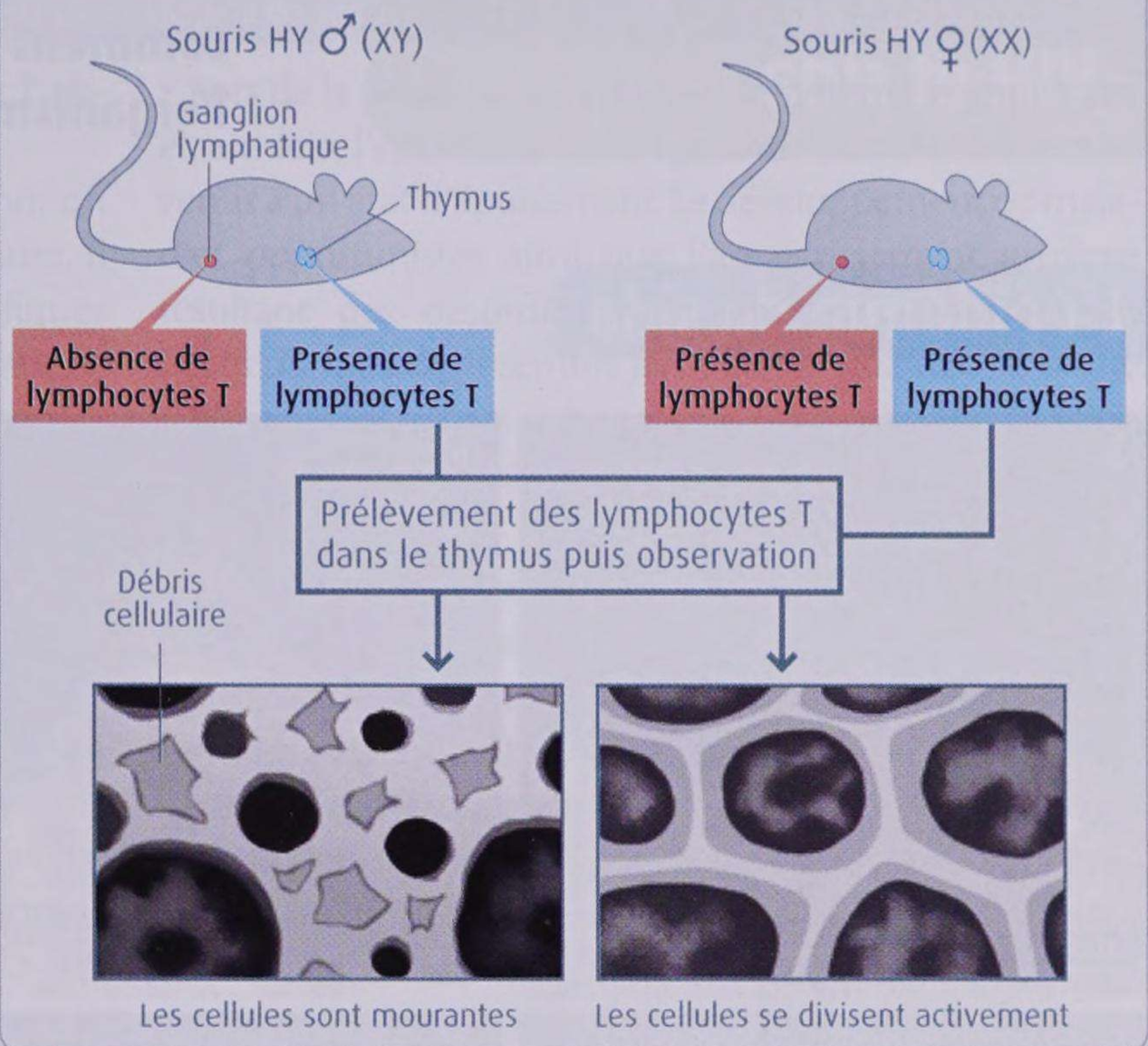
1 Qu'est-ce que la sélection clonale ?

Le devenir des cellules immunitaires autoréactives

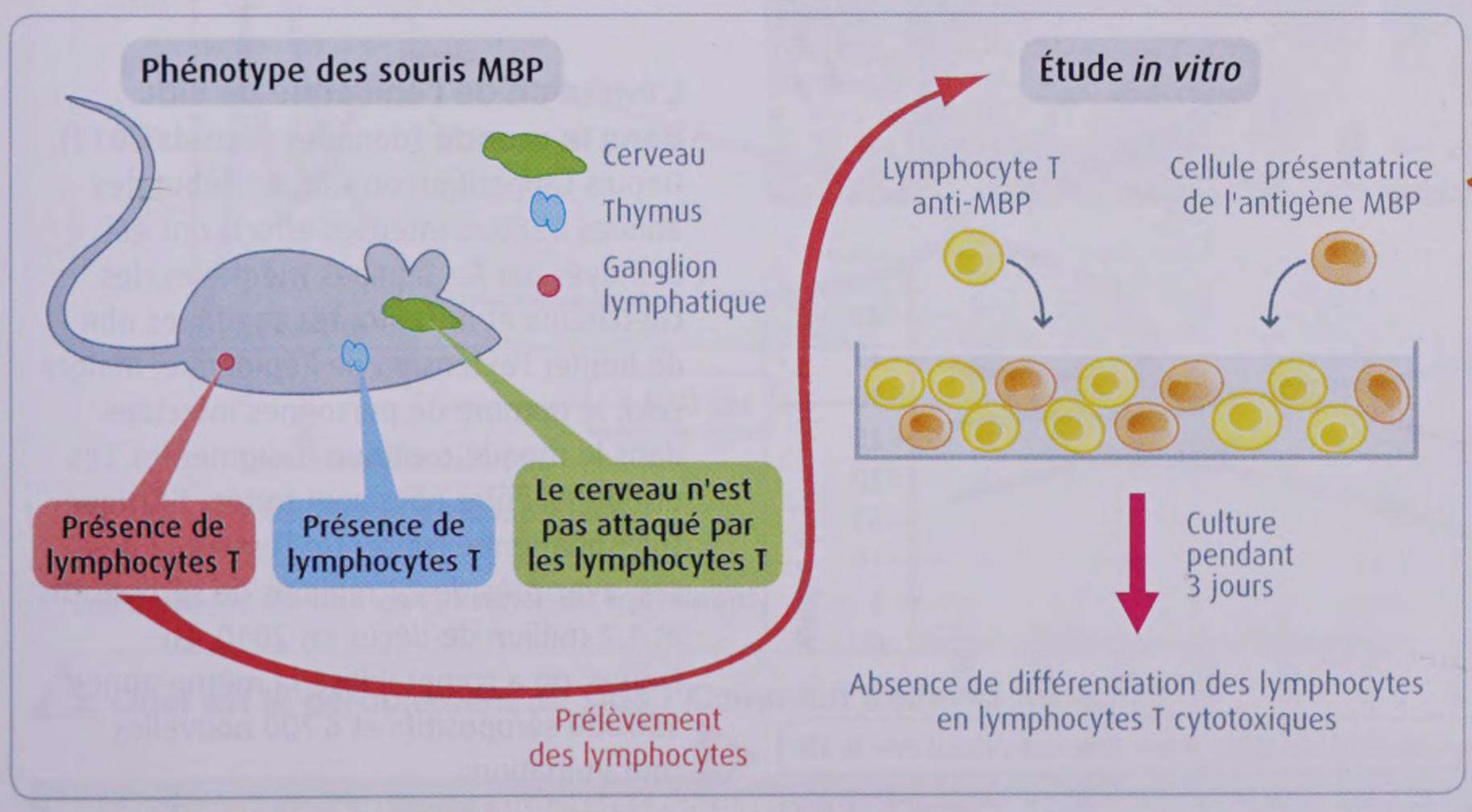
Interview de **Françoise Salvadori**, chercheuse en immunologie

Des millions d'anticorps membranaires et de récepteurs T de spécificités différentes sont produits au hasard dans les organes lymphoïdes primaires : pourquoi ne s'en trouverait-il pas quelques-uns pour reconnaître des molécules de l'organisme ? Nous savons que des lymphocytes portant de tels récepteurs T ou de tels anticorps, dits autoréactifs, existent chez tous les individus. Pourtant, la plupart du temps, notre organisme n'est pas détruit par le biais de ces anticorps et les lymphocytes T cytotoxiques ne lysent nos cellules que si elles sont modifiées (par une infection virale ou par un cancer). Il existe donc des mécanismes variés et complexes qui contrôlent ces lymphocytes autoréactifs, évitant les dommages à l'organisme (sauf dans le cas des maladies dites auto-immunes).

2 Qu'est-ce qu'une cellule autoréactive ?



3 Les souris HY. Ces souris transgéniques ne produisent qu'un seul type de lymphocytes T CD8 naïfs qui expriment tous un récepteur T spécifique de la protéine HY, codée par un gène du chromosome Y et exprimée dans toutes les cellules. Le thymus est l'organe dans lequel sont produits les lymphocytes T naïfs.



4 Les souris MBP. Ces souris transgéniques ne produisent qu'un seul type de lymphocytes T CD8 naïfs. Ils expriment tous un récepteur T spécifique d'une protéine du cerveau (MBP), codée par un autosome. Dans les conditions de l'expérience, la cellule présentatrice de l'antigène est normalement capable d'induire la différenciation des lymphocytes T CD8.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** À partir du schéma construit dans l'unité 4, expliquez les modalités du processus de sélection clonale à l'origine de la formation de lymphocytes T auxiliaires et de plasmocytes spécifiques du virus de la grippe lors d'une infection grippale.

2 **DOC. 2 À 4.** Comparez le phénotype des différentes souris transgéniques. Déduisez-en deux mécanismes par lesquels l'organisme est normalement protégé contre les cellules immunitaires autoréactives.

3 **EN CONCLUSION.** Expliquez comment le système immunitaire répond de façon spécifique à une grande variété d'agents infectieux tout en préservant l'intégrité de l'organisme.

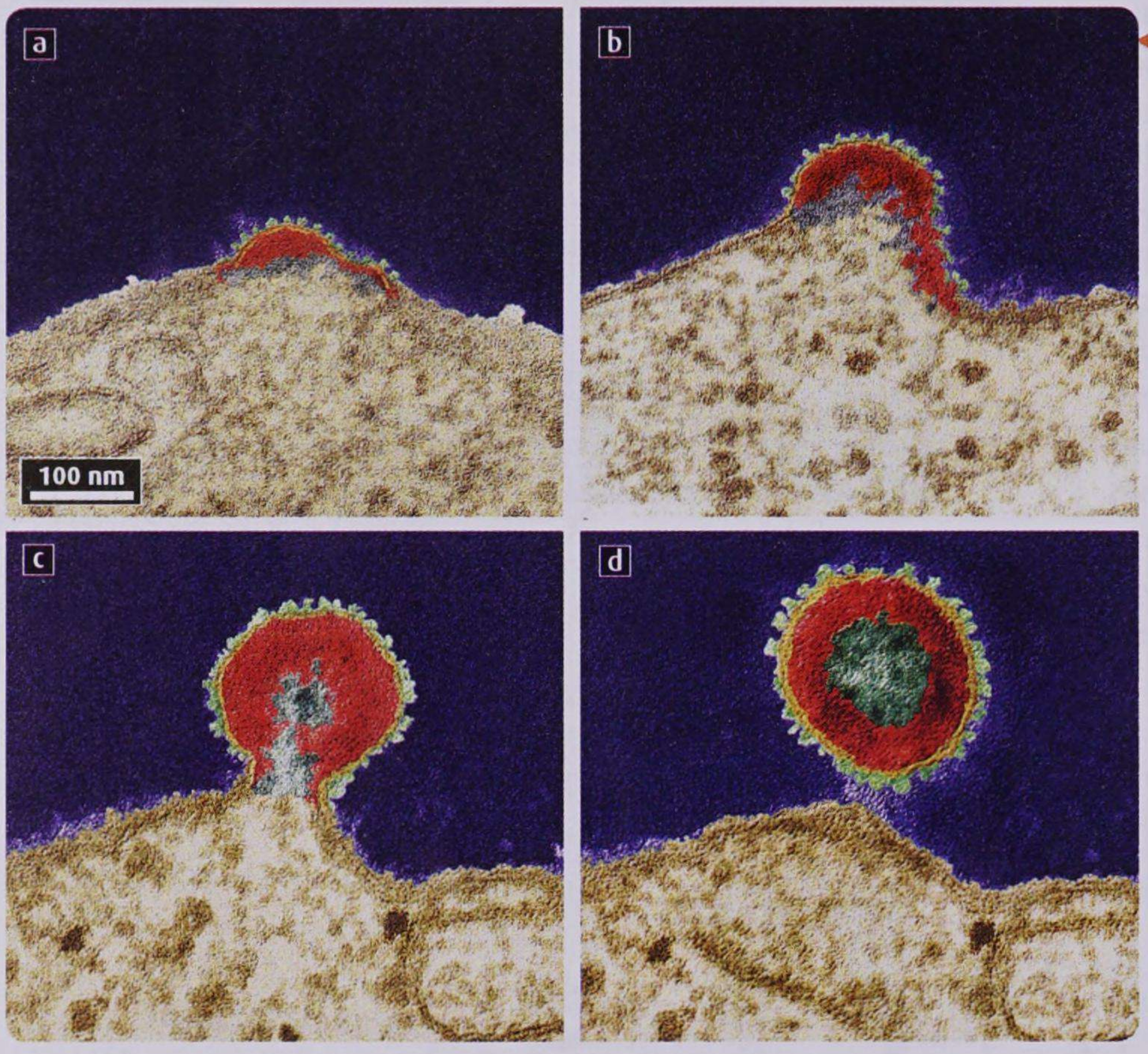
UNITÉ 6

VIH et sida

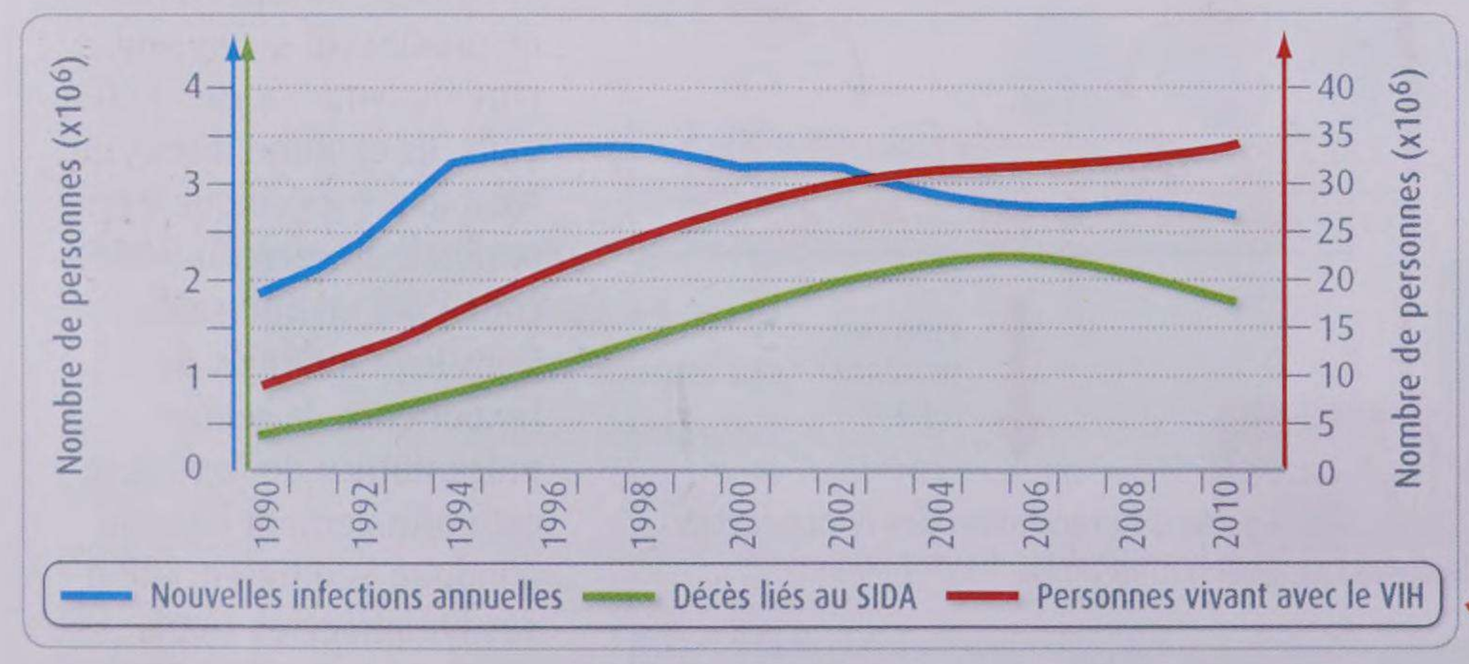
Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) est à l'origine du syndrome de l'immunodéficience acquise, ou sida. En l'absence de traitement, cette grave maladie conduit au décès du malade.

Comment peut-on expliquer l'action du VIH sur l'organisme ?

L'épidémie de sida



1 Bourgeonnement de particules virales à la surface de cellules infectées par le virus de l'immunodéficience humaine (images au MET, fausses couleurs). Le VIH est transmissible par voie sanguine, par des rapports sexuels non protégés et d'une mère infectée à son enfant lors de l'accouchement ou de l'allaitement. Il infecte essentiellement les lymphocytes T CD4, dans une proportion ne dépassant pas 1 %. La multiplication du virus dans les lymphocytes T CD4 peut aboutir à la mort de ces derniers. Parmi les lymphocytes survivants, certains propagent le virus : de nouvelles particules virales issues de la multiplication du virus sont émises par bourgeonnement.



2 L'évolution de l'épidémie de sida dans le monde (données Onusida 2011). Depuis l'apparition du sida au début des années 1980, d'intenses efforts ont été déployés par les équipes médicales, les chercheurs et les autorités sanitaires afin de limiter l'extension de l'épidémie. Malgré cela, le nombre de personnes infectées dans le monde continue d'augmenter. Les disparités entre pays sont fortes : l'Afrique sub-saharienne concentre l'essentiel des cas, avec près de 23 millions de séropositifs et 1,2 million de décès en 2010. En France, on a comptabilisé la même année 150 000 séropositifs et 6 700 nouvelles contaminations.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 3.** Décrivez les caractéristiques et les manifestations du sida et proposez une explication à l'évolution de la concentration sanguine en virus au début de la maladie (doc. 3).

2 **DOC. 2 ET 3.** Décrivez l'évolution de l'épidémie de sida depuis 1990, puis formulez une hypothèse pour expliquer l'évolution du nombre de personnes annuellement infectées et des décès liés au sida.

3 **DOC. 3 ET 4.** Caractérisez les maladies opportunistes liées au sida et justifiez le qualificatif « opportunistes ».

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez le mode d'action du VIH sur l'organisme.

Les manifestations et le traitement du sida

Interview de **Jacques Leibowitch**, spécialiste du sida à l'hôpital de Garches

– Comment se déroule le sida en l'absence de traitement?

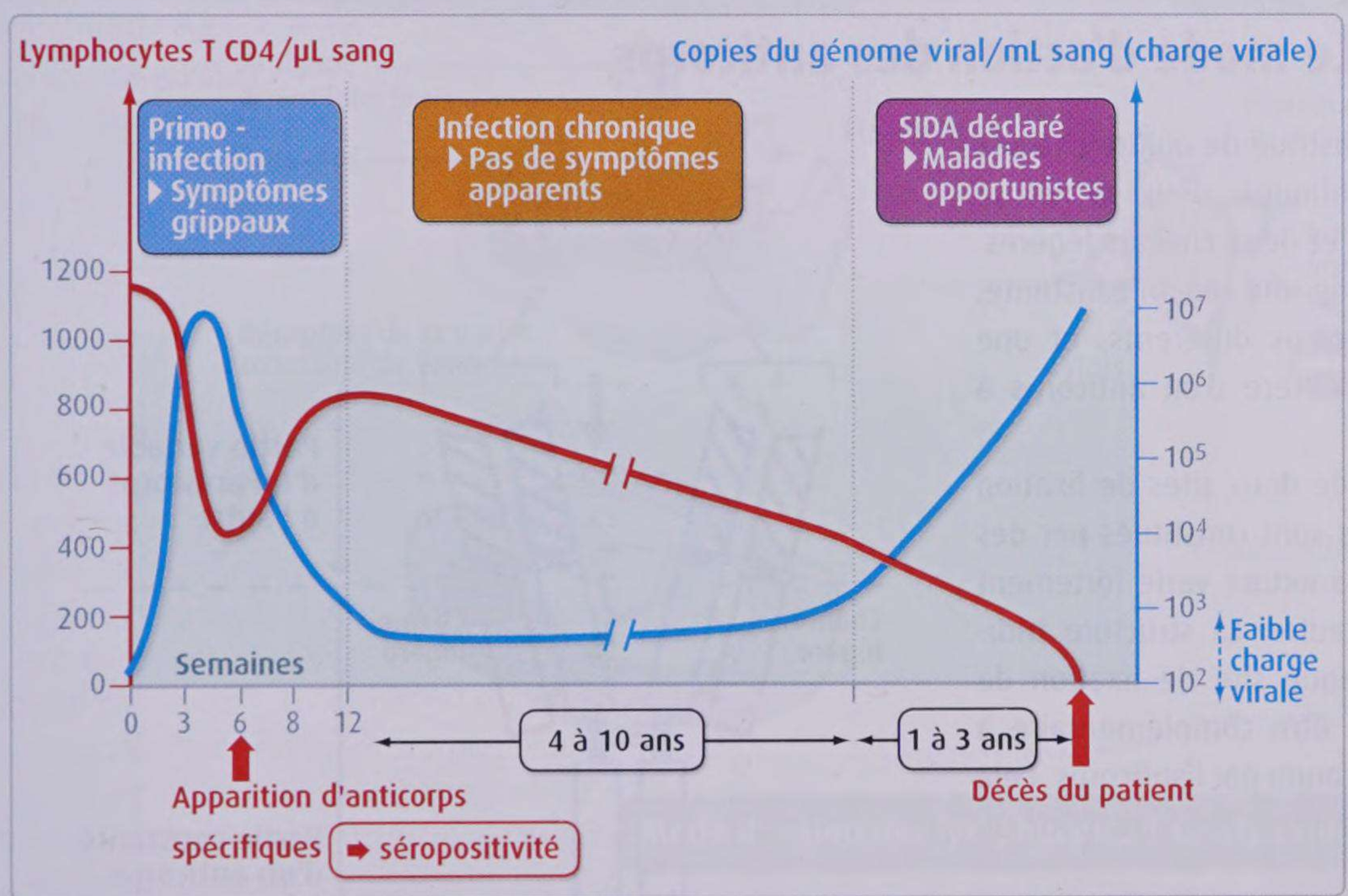
• Durant la phase de primo-infection, on observe une forte réponse immunitaire. Il en résulte l'apparition d'anticorps sanguins spécifiques du VIH, qui marquent l'état de séropositivité du patient.

• Durant la phase d'infection chronique, le VIH se multiplie activement dans les organes lymphoïdes. Pour des raisons encore mal comprises, ces organes se trouvent alors en état d'activation quasi-permanente, ce qui produit une inflammation chronique. Cette dernière serait source de déséquilibres métaboliques : le patient « brûle », en les arrachant à ses muscles, ses réserves en protéines. La baisse du nombre de lymphocytes T CD4 dans le sang est un événement pathologique parmi d'autres et la relation de cause à effet entre ce paramètre et l'évolution de la maladie est en fait très loin d'être simple.

• Lors de la phase du sida déclaré, le système immunitaire et, au-delà, l'ensemble de l'organisme semblent être parvenus à un état d'épuisement. Le développement de maladies opportunistes ainsi que l'amaigrissement extrême résultant des désordres métaboliques conduisent au décès du malade. Il semble ainsi que le sida résulte d'une addition de facteurs internes propices à la prolifération d'agents infectieux et à la fonte de la masse musculaire.

– Quel est le principe des trithérapies ?

Il s'agit de combinaisons de trois molécules inhibant la multiplication du virus dans les cellules. Grâce à ces traitements mis au point à la fin des années 1990, les personnes séropositives ont désormais une espérance de vie normale et les femmes séropositives traitées suffisamment tôt donnent naissance à des enfants non infectés par le VIH dans près de 100 % des cas. Des recherches actuellement en cours permettraient de diminuer de 40 à 75 % le nombre de jours de prises hebdomadaires de ces médicaments, améliorant le bien-être physiologique et subjectif des sujets traités, tout en réduisant d'autant le coût des traitements. Les résultats des essais pilotes sont assurément prometteurs, mais souvenons-nous que les trithérapies actuelles ne peuvent pas éliminer le virus chez le patient : deux à six semaines après l'arrêt du traitement, le virus reprend toute son activité et la maladie reprend son cours.



Les 3 phases du sida en l'absence du traitement.

3 Quel est le déroulement du sida ? Comment traiter la maladie ?

Maladie (agent causal)	Organe(s) touché(s)	Caractéristiques
Tuberculose (bactérie)	• Poumons • Ganglions lymphatiques • Moelle osseuse	La plus fréquente des maladies opportunistes
Infection à cytomégalovirus (virus)	• Système nerveux central • Tube digestif • Poumons • Rétine	• Nombreux symptômes • Cause de cécité
Pneumocystose (champigon)	Poumons	• L'une des plus caractéristiques des maladies opportunistes • Fréquence élevée

4 Quelques maladies opportunistes.
Alors que ces maladies sont très fréquemment associées au sida, elles sont rares chez les personnes non infectées par le VIH.

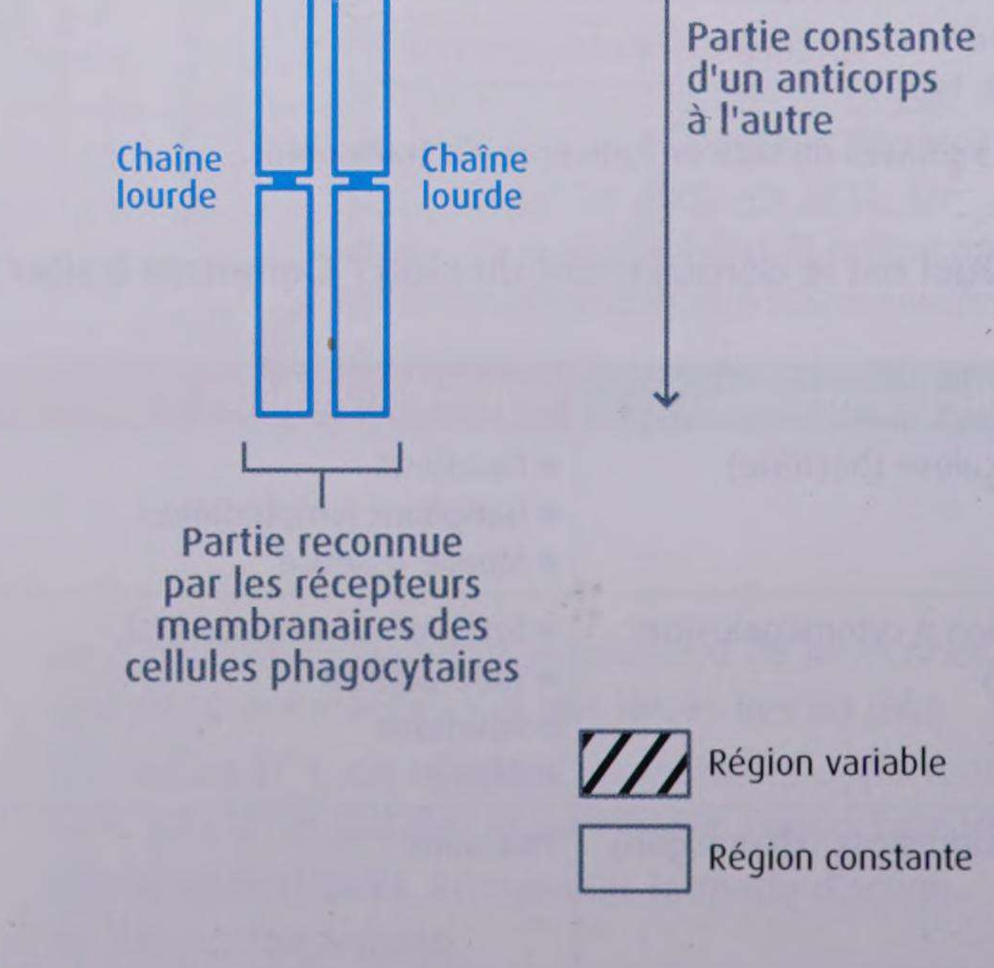
CHAPITRE 2 L'immunité adaptative

UNITÉ 1 La réponse adaptative humorale

- La contamination de l'organisme par un agent infectieux (ou par une molécule étrangère) entraîne l'apparition d'anticorps dans le sérum (protéines de la classe des γ-globulines) : on parle de réponse adaptative humorale.
- Les premiers anticorps apparaissent environ 5 jours après le contact avec l'agent infectieux, alors que les manifestations de la réaction inflammatoire aiguë se poursuivent. La réponse humorale se met donc en place plus lentement que la réponse innée.
- Les anticorps se fixent sur des molécules étrangères à l'organisme portées par l'agent infectieux à l'origine de la réponse humorale (protéines de l'enveloppe du virus de la grippe par exemple). Ces molécules sont qualifiées d'antigènes.
- La liaison anticorps-antigène entraîne une agglutination de l'antigène et la formation d'un complexe immun observable par le test d'Ouchterlony.
- Chaque anticorps produit est spécifique d'un antigène : il reconnaît un unique antigène, porté par l'agent infectieux qui a contaminé l'organisme. La réponse humorale est donc plus spécifique que la réponse innée.

UNITÉ 2 Le mode d'action des anticorps

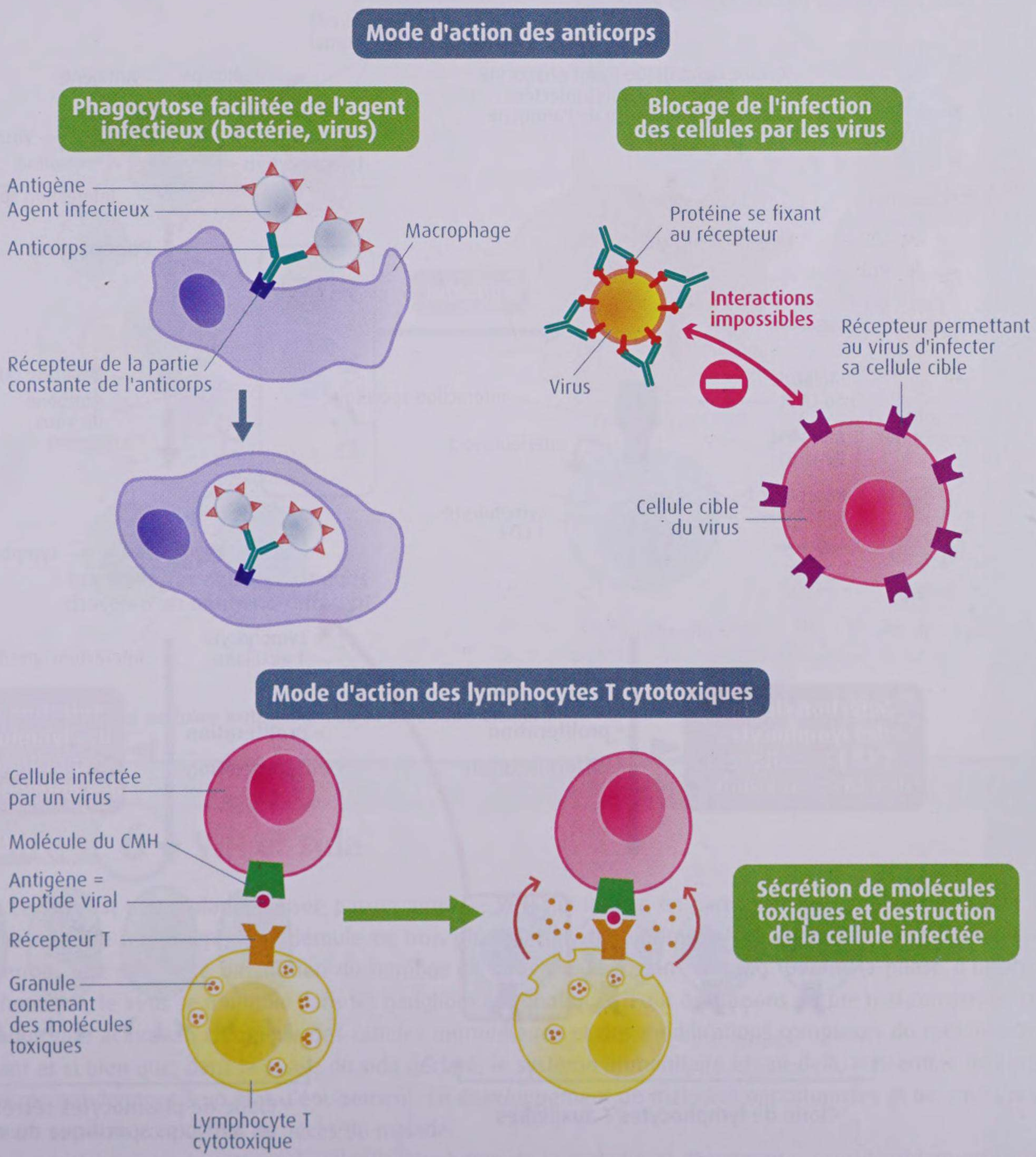
- Un anticorps est constitué de quatre chaînes polypeptidiques identiques deux à deux : deux chaînes lourdes et deux chaînes légères. Chaque chaîne possède une région constante, identique entre anticorps différents, et une région variable, qui diffère d'un anticorps à l'autre.
- Un anticorps possède deux sites de fixation à l'antigène. Ces sites sont constitués par des acides aminés dont la nature varie fortement d'un anticorps à un autre. La structure tridimensionnelle de chaque site de fixation de l'antigène peut ainsi être complémentaire à celle de l'antigène reconnu par l'anticorps. Cela explique la spécificité d'un anticorps pour un antigène donné.
- Les anticorps recouvrent les sites de fixation des virus à leurs cellules cibles, empêchant ainsi leur infection.
- Les cellules phagocytaires possèdent des récepteurs de la partie constante des anticorps. Cela favorise la phagocytose des agents infectieux sur lesquels se sont fixés des anticorps spécifiques (voir schéma page ci-contre). Les anticorps agissent ainsi en collaboration avec les acteurs de l'immunité innée.



Relations entre la structure et le mode d'action d'un anticorps.

UNITÉ 3 La réponse adaptative cellulaire

- La production de lymphocytes T cytotoxiques est un autre aspect de la réponse immunitaire adaptative : on parle de réponse cellulaire. Celle-ci est également plus lente et plus spécifique que la réponse innée.
- Les lymphocytes T cytotoxiques se fixent sur une cellule infectée par un virus. Cela induit la libération de molécules toxiques contenues dans les granules cytoplasmiques du lymphocyte et la mort de la cellule infectée. Les lymphocytes T cytotoxiques produits lors d'une réponse cellulaire tuent uniquement les cellules infectées par le virus avec lequel l'organisme a été en contact : ils sont spécifiques de ce virus.
- Chaque lymphocyte T cytotoxique porte sur sa membrane plasmique une protéine appelée récepteur T, qui reconnaît un unique antigène. Cet antigène est un peptide issu de la digestion de protéines du virus par la cellule infectée. Ce peptide est associé aux molécules du CMH présentes sur la membrane plasmique de la cellule infectée. La spécificité des lymphocytes T cytotoxiques s'explique par le fait qu'un récepteur T ne reconnaît qu'un unique peptide associé aux molécules du CMH.
- La reconnaissance par un récepteur T d'un peptide associé aux molécules du CMH à la surface d'une cellule infectée entraîne la fixation du lymphocyte sur cette dernière et la libération des molécules toxiques.



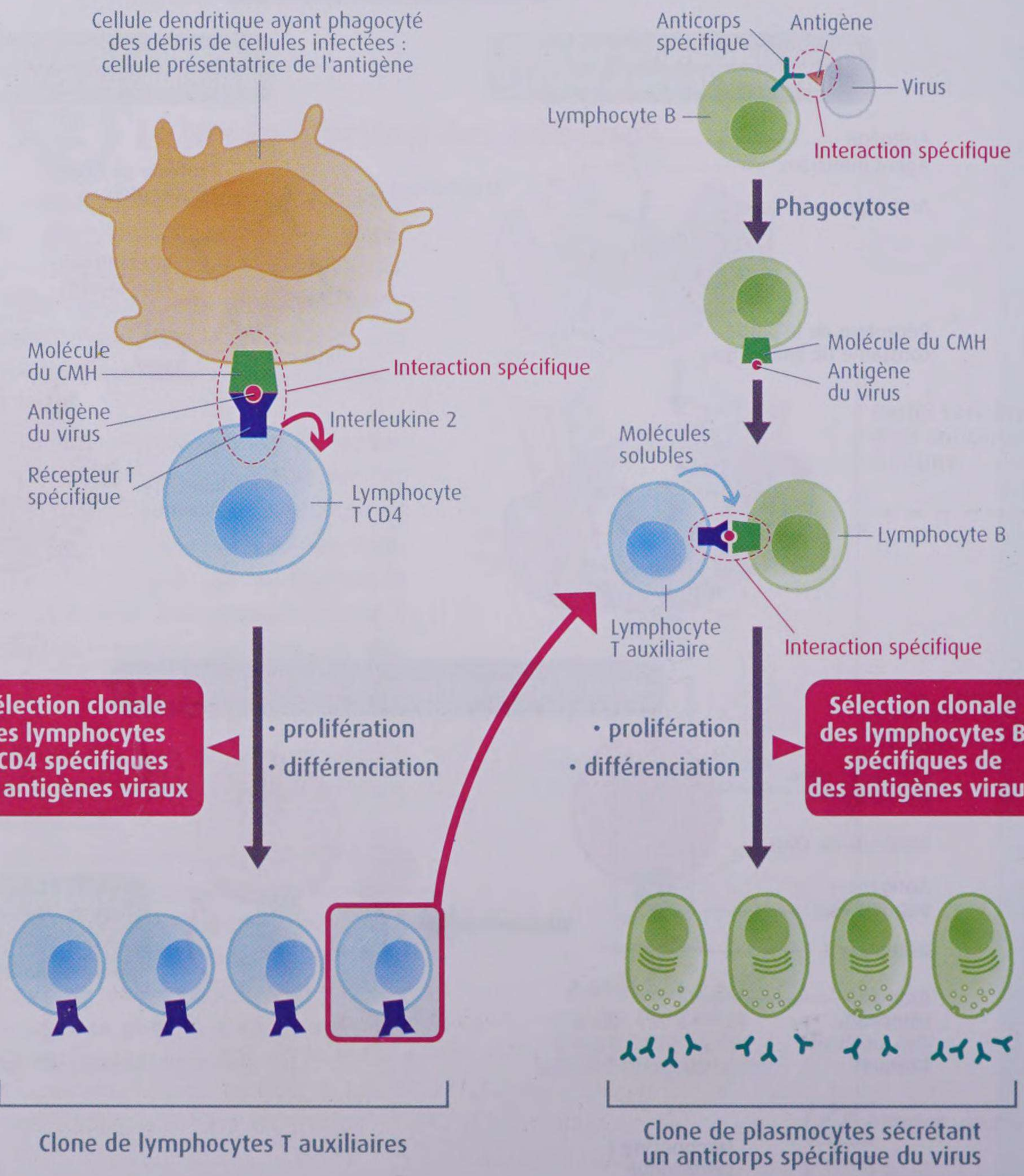
Mode d'action des lymphocytes T cytotoxiques et des anticorps.

UNITÉ 4 L'origine des anticorps

• La pénétration d'un agent infectieux dans l'organisme déclenche une réaction inflammatoire lors de laquelle les cellules dendritiques phagocytent l'agent infectieux ou des débris de cellules infectées par lui. Elles présentent alors sur leur membrane plasmique des antigènes de cet agent infectieux. Ces antigènes sont associés aux molécules du CMH.

• Les cellules dendritiques migrent ensuite vers un ganglion lymphatique. Là, les lymphocytes T CD4 dont le récepteur T reconnait spécifiquement un antigène de l'agent infectieux (associé aux molécules du CMH) interagissent avec les cellules dendritiques, qui jouent ainsi le rôle de cellules présentatrices de l'antigène aux lymphocytes T. Sous l'effet de cette interaction, les lymphocytes T CD4 sécrètent de l'interleukine 2, molécule qui induit leur prolifération et leur différenciation en lymphocytes T auxiliaires.

• Grâce à leur récepteur T, ces lymphocytes T auxiliaires peuvent interagir avec des lymphocytes B exprimant, sur leur membrane plasmique, un anticorps reconnaissant spécifiquement un antigène de l'agent infectieux. En effet, grâce à cet anticorps, ces lymphocytes B phagocytent l'agent infectieux puis expriment sur leur membrane plasmique des antigènes de ce dernier (associés aux molécules du CMH). Sous l'effet de l'interaction avec les lymphocytes T auxiliaires et de molécules solubles sécrétées par ces derniers, les lymphocytes B prolifèrent puis se différencient en cellules sécrétrices d'anticorps, ou plasmocytes. Les anticorps sécrétés reconnaissent spécifiquement les antigènes de l'agent infectieux.

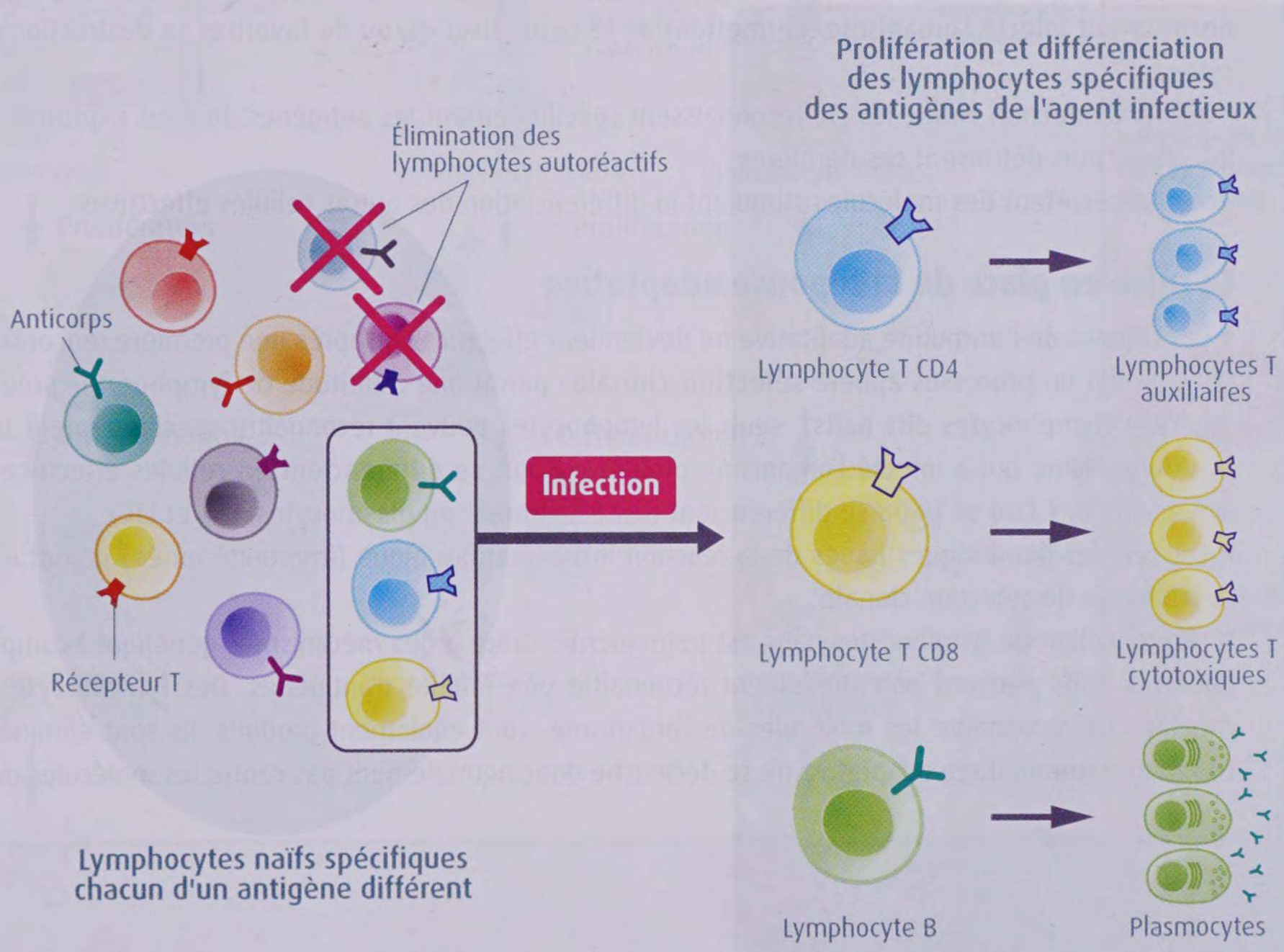


L'origine des anticorps sécrétés lors d'une infection grippale.

UNITÉ 5 La maturation du système immunitaire

• L'organisme produit en permanence un grand nombre de lymphocytes B et T dits naïfs, possédant chacun un récepteur membranaire (anticorps ou récepteur T) spécifique d'un antigène différent. S'ils ne rencontrent pas cet antigène, ces lymphocytes ne se divisent pas et meurent après quelques semaines. En revanche, lorsqu'un de ces lymphocytes rencontre l'antigène auquel se lie son récepteur membranaire, il se multiplie puis se différencie en un clone de cellules effectrices. La multiplication et la différenciation sont induites par des interactions avec les cellules présentatrices de l'antigène et/ou des lymphocytes T auxiliaires (voir schéma page ci-contre). Grâce à ce processus, appelé sélection clonale, le système immunitaire peut reconnaître de façon spécifique une grande diversité d'agents infectieux.

• L'organisme produit également des lymphocytes reconnaissant ses propres molécules. Ces lymphocytes autoréactifs sont détruits ou inactivés. La réponse immunitaire adaptative ne se déclenche donc pas contre des molécules de l'organisme (sauf dans le cas de maladies dites autoimmunues).



Élimination des cellules autoréactives et sélection clonale.

UNITÉ 6 VIH et sida

• Le sida est une maladie causée par un virus (le VIH) qui infecte en particulier les lymphocytes T CD4. En l'absence de traitement, il se déroule en trois phases. Lors de la primo-infection, une réponse immunitaire permet une très forte diminution du nombre de virus circulant dans le sang. Durant la phase d'infection chronique, le virus se multiplie dans les ganglions lymphatiques. Pour des raisons encore mal comprises, cela induit une activation chronique des cellules immunitaires et des modifications complexes du métabolisme, tant et si bien que, dans la phase du sida déclaré, le système immunitaire et, au-delà, l'ensemble de l'organisme parviennent à un état d'épuisement. Le développement de maladies opportunistes et un amaigrissement extrême conduisent au décès du malade.

• Les trithérapies permettent de ralentir l'évolution de la maladie et d'augmenter considérablement l'espérance de vie des patients. Elles ne permettent toutefois pas d'éliminer le virus de l'organisme.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2

L'immunité adaptative

L'essentiel par le texte

Caractéristiques et effecteurs de l'immunité adaptative

• Chez les vertébrés, l'immunité adaptative s'ajoute à l'immunité innée lorsque cette dernière n'a pas permis l'élimination de l'agent infectieux ayant déclenché la réaction immunitaire. L'immunité adaptative se met en place plus lentement que l'immunité innée, mais elle est plus ciblée : elle repose sur la reconnaissance spécifique d'**antigènes**, c'est-à-dire de molécules portées par l'agent infectieux et seulement par lui (protéines membranaires du virus grippal par exemple).

• Les cellules effectrices de l'immunité adaptative sont les **plasmocytes**, les **lymphocytes T cytotoxiques** (LTC) et les **lymphocytes T auxillaires** (LTA) :

– les plasmocytes sécrètent des **anticorps**. Ces protéines se lient spécifiquement à un antigène du microorganisme ayant infecté l'organisme, permettant de le neutraliser et/ou de favoriser sa destruction par les phagocytes ;

– en cas d'infection virale, les LTC reconnaissent spécifiquement les antigènes du virus exprimés par les cellules infectées, puis détruisent ces dernières ;

– les LTA sécrètent des molécules stimulant la différenciation des autres cellules effectrices.

La mise en place de la réponse adaptative

• Les cellules de l'immunité adaptative ne deviennent effectrices qu'après une première rencontre avec un antigène, selon un processus appelé **sélection clonale** : parmi une multitude de lymphocytes préexistant à toute infection (lymphocytes dits naïfs), seuls les lymphocytes pouvant reconnaître spécifiquement un antigène du microorganisme qui a infecté l'organisme prolifèrent puis se différencient en cellules effectrices (les lymphocytes naïfs B, T CD4 et T CD8 se différencient respectivement en plasmocytes, LTA et LTC).

• Les cellules dendritiques issues de la réaction inflammatoire aiguë (immunité innée) jouent un rôle clé dans le processus de sélection clonale.

• La production de lymphocytes naïfs est permanente. Grâce à des mécanismes génétiques complexes, ces lymphocytes naïfs peuvent potentiellement reconnaître une infinité d'antigènes. Des **lymphocytes autoréactifs**, capables de reconnaître les molécules de l'organisme, sont également produits. Ils sont éliminés ou inactivés. La réponse immunitaire adaptative ne se déclenche donc normalement pas contre les molécules de l'organisme.

Les capacités et attitudes

- Mettre en œuvre des protocoles pour comprendre la nature des anticorps et leur spécificité **(unité 1)**
- Utiliser un logiciel et exploiter des documents pour comprendre la spécificité de l'immunité adaptative **(unités 2 et 3)**
- Extraire et organiser des informations pour comprendre l'origine des effecteurs de l'immunité adaptative **(unités 4 et 5)**
- Extraire et organiser des informations pour comprendre l'origine du sida **(unité 6)**

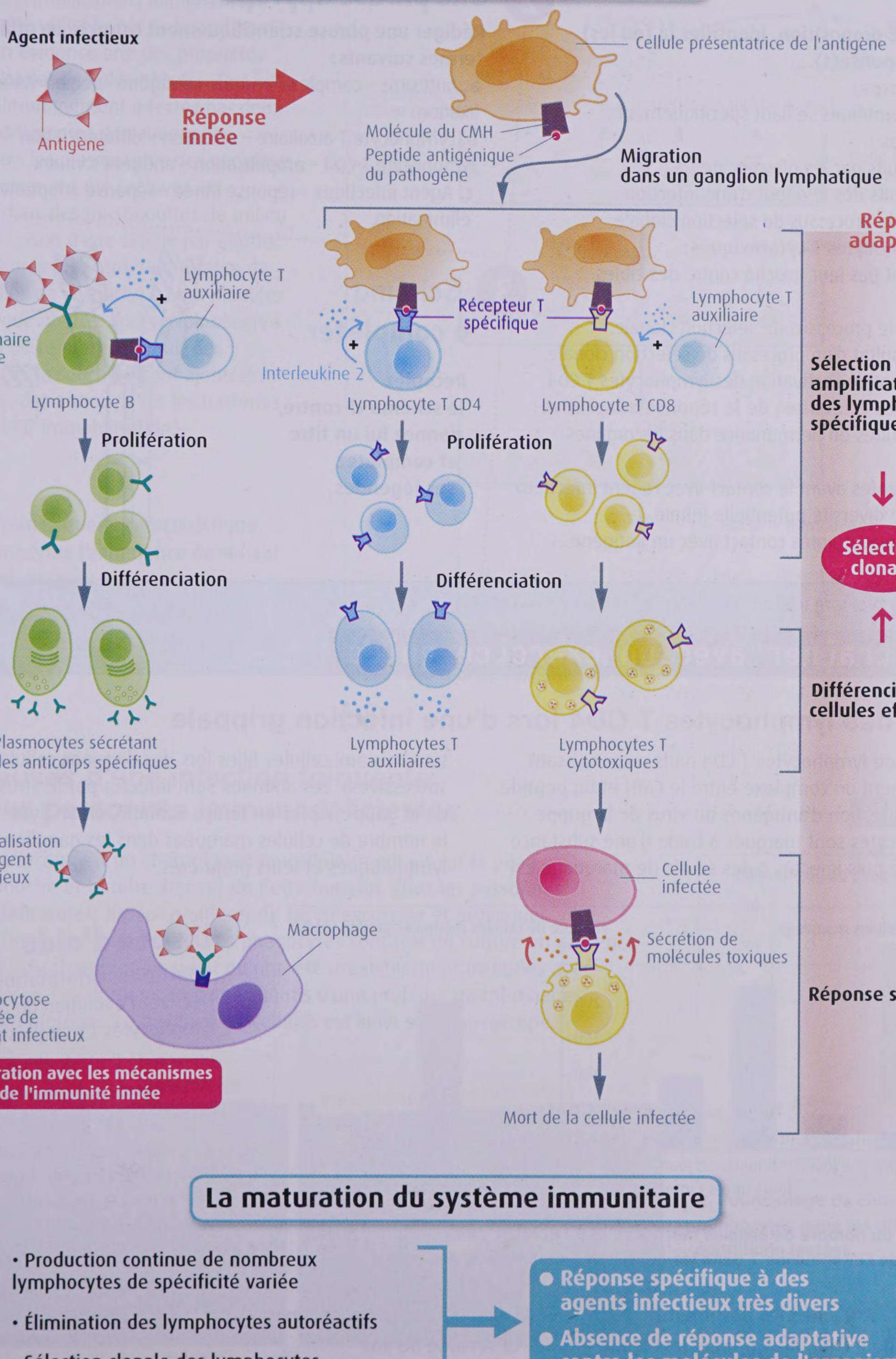
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Anticorps : protéine sécrétée par les plasmocytes et se liant spécifiquement à un antigène.
Antigène : molécule ou fragment de molécule pouvant déclencher une réaction immunitaire adaptative.
Lymphocyte T cytotoxique : lymphocyte T CD8 différencié en cellule détruisant spécifiquement les cellules infectées.
Lymphocyte T auxilaire : lymphocyte issu de la différenciation d'un lymphocyte T CD4, qui sécrète des molécules stimulant la différenciation des lymphocytes B et des lymphocytes T CD8.
Lymphocyte autoréactif : lymphocyte qui reconnaît une molécule de l'organisme qui l'a produit.
Plasmocyte : lymphocyte B différencié en cellule sécrétrice d'anticorps.
Sélection clonale : processus permettant la production des cellules effectrices de l'immunité adaptative

L'essentiel par l'image

La réponse immunitaire adaptative



La maturation du système immunitaire

- Production continue de nombreux lymphocytes de spécificité variée
- Élimination des lymphocytes autoréactifs
- Sélection clonale des lymphocytes spécifiques lors d'une infection

→ **Réponse spécifique à des agents infectieux très divers**
→ **Absence de réponse adaptative contre les molécules de l'organisme**

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Les anticorps :

a. sont des protéines se liant spécifiquement aux antigènes.
b. sont produits par les plasmocytes.
c. sont produits dès le début d'une infection.
d. subissent le processus de sélection clonale.

2. Les lymphocytes T cytotoxiques :

a. ne dirigent pas leur toxicité contre des cibles spécifiques.
b. subissent le processus de sélection clonale.
c. sont le résultat d'un processus de sélection clonale.
d. proviennent de l'activation des lymphocytes T CD4.

3. Les cellules effectrices de la réponse adaptative :

a. sont produites en permanence dans les organes lymphoïdes.
b. sont présentes avant le contact avec l'agent infectieux.
c. sont d'une diversité potentielle infinie.
d. se différencient après contact avec un antigène.

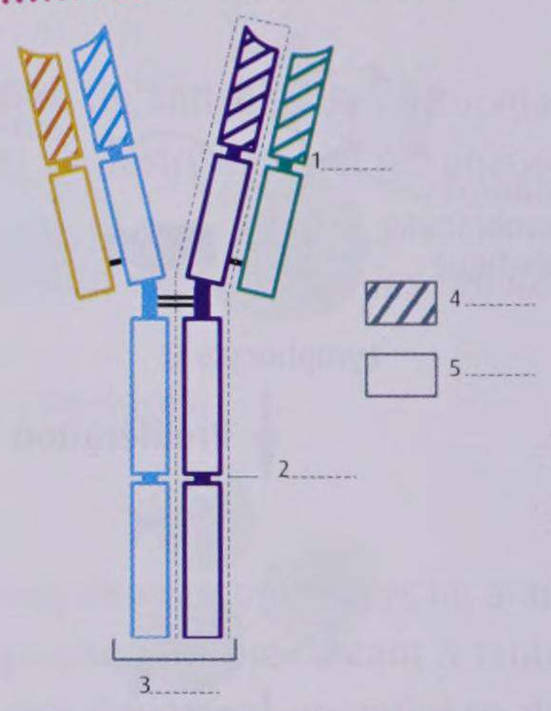
2 Une phrase appropriée

Rédiger une phrase scientifiquement correcte en utilisant les termes suivants :

a. Anticorps – complexe immun – antigène – région variable – fixation.
b. Lymphocyte T auxiliaire – sélection – différenciation – lymphocyte T CD4 – amplification – antigènes viraux.
c. Agent infectieux – réponse innée – réponse adaptative – élimination.

3 Schéma à compléter

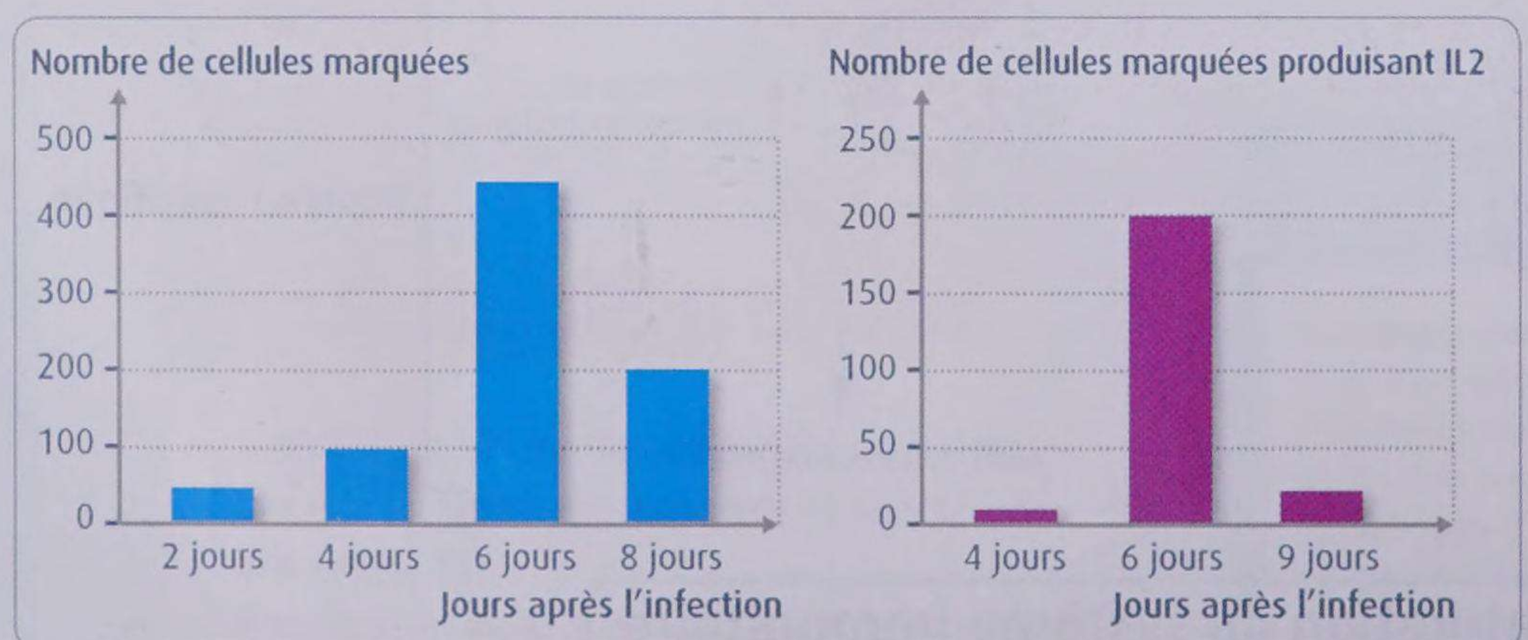
Recopiez le schéma ci-contre, donnez lui un titre et complétez ses légendes.



s'entraîner avec un exercice guidé

4 Le rôle des lymphocytes T CD4 lors d'une infection grippale

On dispose de lymphocytes T CD4 naïfs reconnaissant spécifiquement un complexe entre le CMH et un peptide issu de la digestion d'antigènes du virus de la grippe. Ces lymphocytes sont marqués à l'aide d'une substance fluorescente puis injectés à des souris (le marquage est transmis aux cellules filles lors des divisions cellulaires successives). Les animaux sont infectés par le virus de la grippe. Après un temps variable, on analyse le nombre de cellules marquées dans les ganglions lymphatiques et leurs propriétés.



1. Évolution du nombre de cellules marquées et du nombre de cellules marquées produisant de l'interleukine 2 dans les ganglions lymphatiques des souris.

QUESTION ❶ D'après les documents, déterminez le devenir des lymphocytes T CD4 spécifiques du virus grippal lors d'une grippe. ❷ À l'aide de vos connaissances, expliquez en quoi les processus mis en évidence permettent de lutter contre une infection grippale.

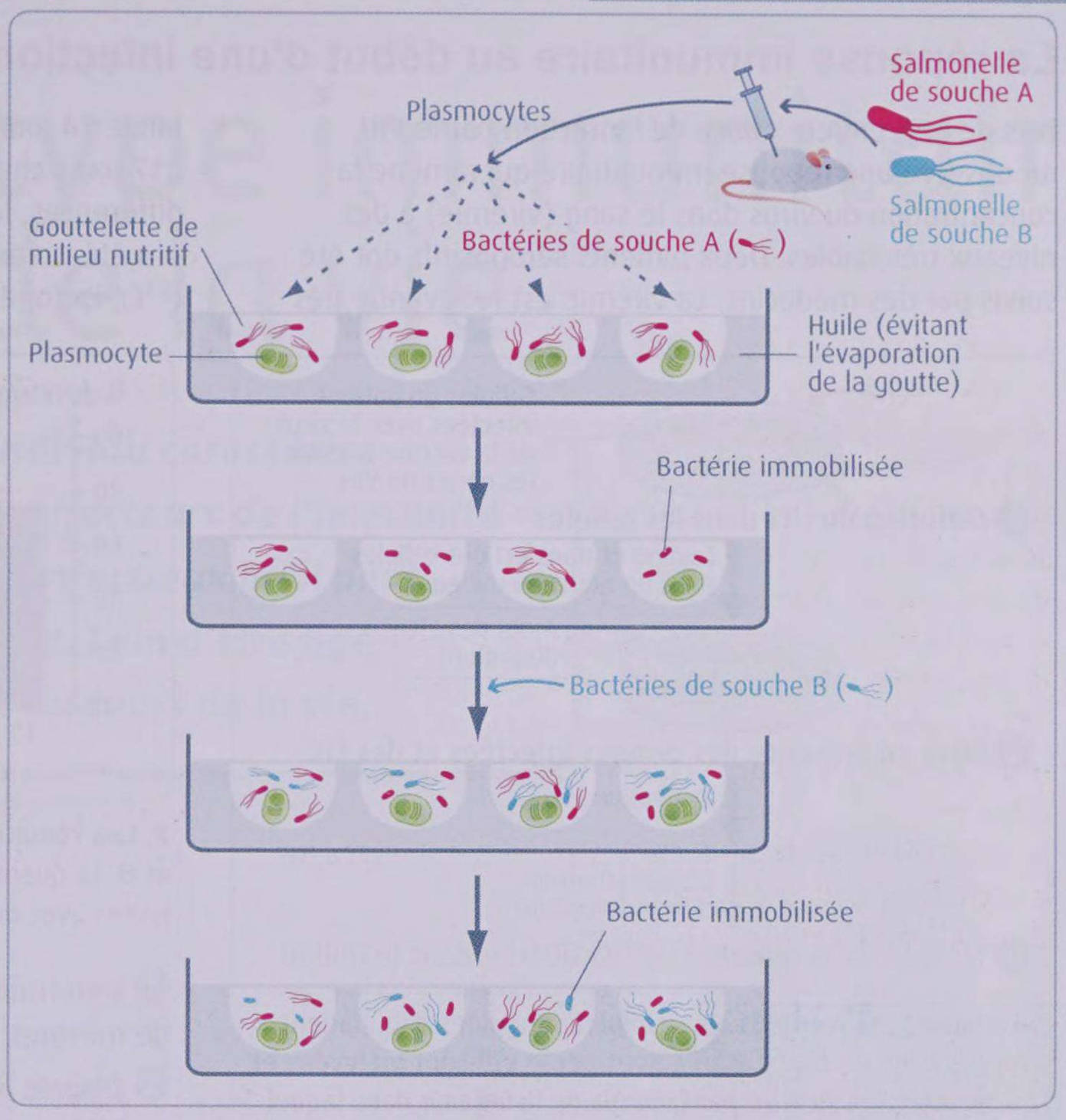
Un peu d'aide

- **Saisir des informations**
Décrivez l'évolution du nombre de lymphocytes T marqués produisant ou non de l'interleukine 2 (IL2).
- **Mobiliser ses connaissances**
Rappelez l'origine et la fonction des lymphocytes T produisant IL2.
- **Raisonner et conclure**
– Présentez les deux mécanismes expliquant les évolutions observées et précisez l'évolution des lymphocytes T CD4 spécifiques du virus grippal.
– Présentez les conséquences probables de cette évolution sur la résolution de l'infection grippale.

5 L'expérience de G. Nossal (1959)

Analyser des résultats expérimentaux

Les salmonelles sont des bactéries mobiles à l'origine d'intoxications alimentaires. Elles ont été utilisées par G. Nossal pour mettre en évidence une des propriétés fondamentales des plasmocytes. Des rats ont été simultanément infectés par deux souches différentes de salmonelles, A et B. Puis les plasmocytes des ganglions lymphatiques ont été prélevés et déposés dans des microgouttes de milieu nutritif, à raison d'une cellule par goutte. Quatre heures plus tard, une dizaine de salmonelles de la souche A sont ajoutées dans chaque goutte. Après avoir observé les effets de ce premier ajout, des bactéries de la souche B sont ajoutées. La fixation des anticorps sur les bactéries entraîne leur immobilisation.



1. Les résultats de l'expérience.

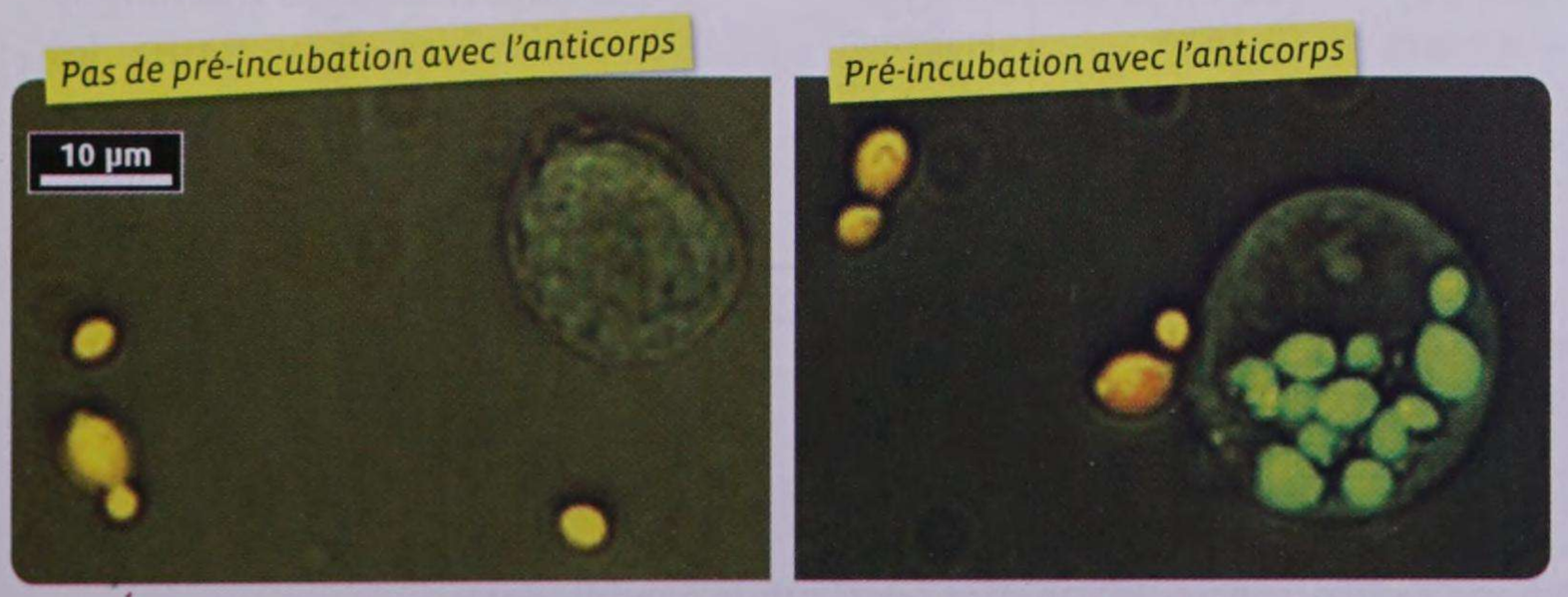
❶ Déterminez quelle caractéristique des plasmocytes l'expérience de Nossal permet de déterminer.

❷ Décrivez les résultats obtenus et, grâce à vos connaissances, proposez une explication.

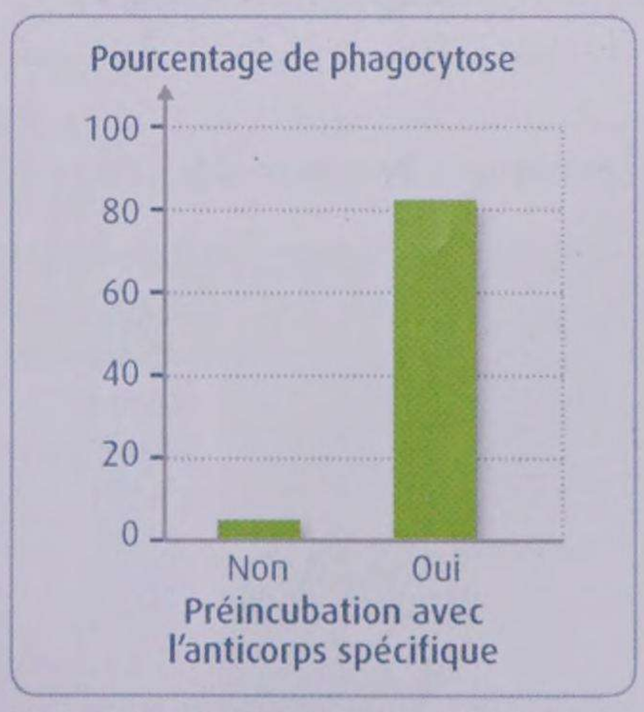
6 Les causes d'une infection fréquente chez les personnes immunodéficientes

Observer et raisonner

Candida albicans est un champignon unicellulaire qui vit sur la peau, dans la bouche et le tube digestif de l'être humain. Chez les personnes immunodéficientes, il peut proliférer de façon excessive et provoquer des infections : les candidoses. Des phagocytes sont mis en culture en présence de cellules du champignon ayant ou non été préalablement incubées avec des anticorps. Ces derniers sont spécifiques d'une protéine membranaire de *Candida albicans*. Le devenir des cellules est suivi sous microscope.



1. Devenir des champignons *C. albicans* mis en culture avec des phagocytes.
Les champignons sont marqués en orange lorsqu'ils sont extracellulaires, en vert quand ils sont à l'intérieur du phagocyte. (Clichés au MO.)



2. Pourcentage de champignons phagocytés dans les différentes conditions testées.

● Expliquez, en vous appuyant sur un schéma, pourquoi les patients immunodéprimés développent souvent des candidoses.

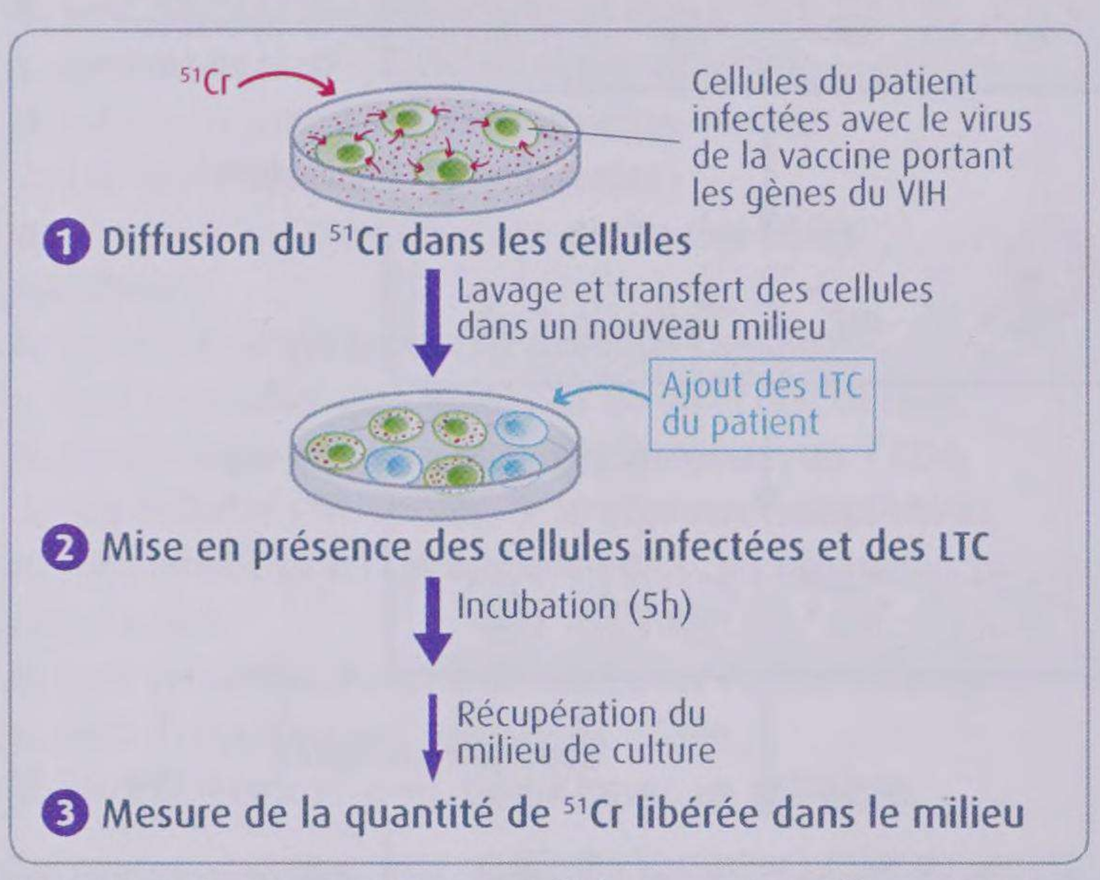
EXERCICES

Appliquer ses connaissances

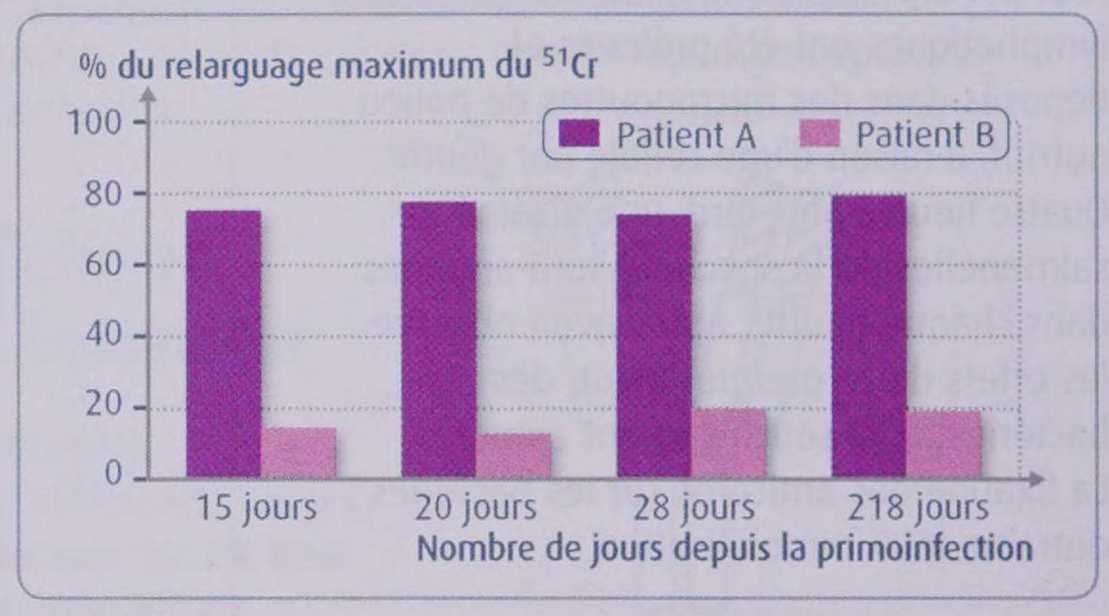
7 La réponse immunitaire au début d'une infection par le VIH

Raisonner

Lors de la première phase de l'infection par le VIH, on observe une réponse immunitaire qui ramène la concentration du virus dans le sang (virémie) à des niveaux très faibles. Deux patients séropositifs ont été suivis par des médecins. La virémie est redevenue très faible 14 jours après l'infection chez la patient A et après 217 jours chez le patient B. Afin de comprendre ces différences, les lymphocytes T cytotoxiques de ces patients ont été isolés, puis étudiés grâce au test du chrome 51 (^{51}Cr, isotope radioactif).



1. Le test du chrome 51. Des cellules sanguines d'un patient séropositif qui ne sont pas infectées par le VIH sont prélevées et ensuite infectées *in vitro* par un virus de la vaccine dans lequel on a introduit des gènes du VIH. Ces cellules expriment alors sur leur membrane plasmique des complexes CMH-peptides du VIH.



2. Les résultats du test du chrome 51 chez les patients A et B. La quantité de ^{51}Cr relarguée lorsque les cellules sont lysées avec un détergent constitue la référence (valeur 100 %).

1. Déterminez ce que le test du chrome 51 permet de mesurer.
2. D'après les documents et vos connaissances, expliquez la différence de réponse immunitaire entre les patients A et B dans la première phase de l'infection par le VIH.

8 Les expériences de J. Bordet sur le choléra (1898)

Raisonner et construire un schéma

Le choléra est une maladie épidémique contagieuse causée par une bactérie. Sa mobilité, observable au microscope, lui a valu le nom de *Vibrio choleræ* (vibrion cholérique). En 1898, le biologiste belge J. Bordet réalise une série d'expériences. Il souhaite étudier les propriétés anti-bactériennes de sérums de lapins qui ont été immunisés contre différentes souches de vibrions cholériques.

Provenance du sérum utilisé / Souche bactérienne mise en présence du sérum	Lapin immunisé contre la souche d'Afrique du Nord		Lapin immunisé contre la souche de Russie	
	Étape n° 1 : Sérum porté à 56 °C	Étape n° 2 : Ajout d'un sérum non chauffé mais dépourvu d'anticorps	Étape n° 1 : Sérum porté à 56 °C	Étape n° 2 : Ajout d'un sérum non chauffé mais dépourvu d'anticorps
Souche de Russie	Vibrions mobiles et prolifération	Vibrions mobiles et prolifération	Immobilisation des vibrions Absence de lyse	Lyse des vibrions

1. Les résultats expérimentaux.

La lyse des bactéries est due à la formation de pores dans leur membrane plasmique qui permettent le passage d'eau et d'ions. Des protéines présentes dans le sérum, si elles sont activées, s'assemblent en un complexe d'attaque membranaire qui s'insère dans la membrane des bactéries et y forme les pores. Ces protéines sont inactivées par des températures supérieures à 50 °C. Elles font partie d'un ensemble de protéines dites « du complément ».

2. Les protéines du complément.

1. Grâce à l'étude des documents et à vos connaissances, interprétez les résutats expérimentaux et indiquez quelle propriété de la réponse immunitaire humorale est ici mise en évidence.
2. Représentez par un schéma explicatif l'immobilisation des vibrions suivie de leur lyse.

CHAPITRE 3

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Le phénotype immunitaire d'un individu caractérise sa capacité à répondre, grâce aux effecteurs de l'immunité adaptative, aux différents agents infectieux qu'il peut rencontrer dans son environnement. Loin d'être figé, le phénotype immunitaire évolue au cours de la vie.

Comment le phénotype immunitaire d'un individu évolue-t-il au cours de sa vie ?

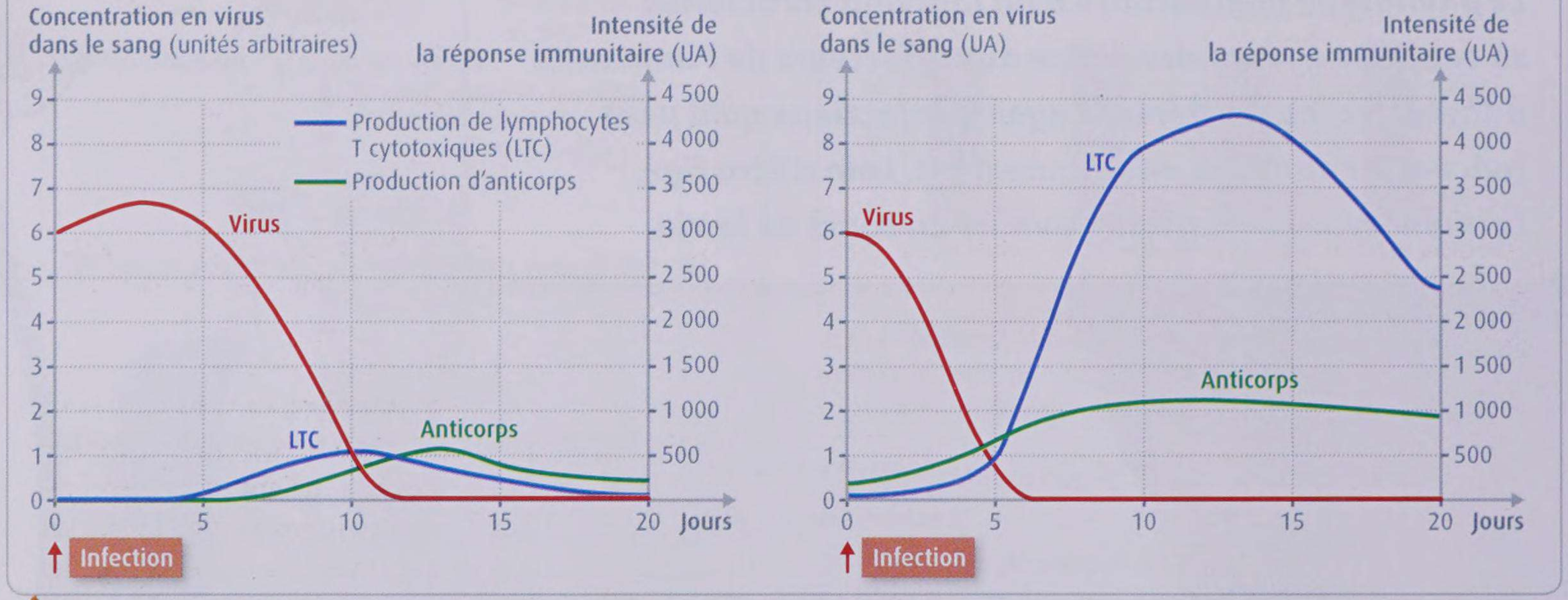
UNITÉ 1

La mémoire immunitaire

Lors d'une infection, le système immunitaire produit des anticorps et des lymphocytes T cytotoxiques spécifiques de l'agent infectieux.

Comment le système immunitaire réagit-il face à un agent infectieux qu'il a déjà rencontré ?

Mettre en évidence une mémoire immunitaire



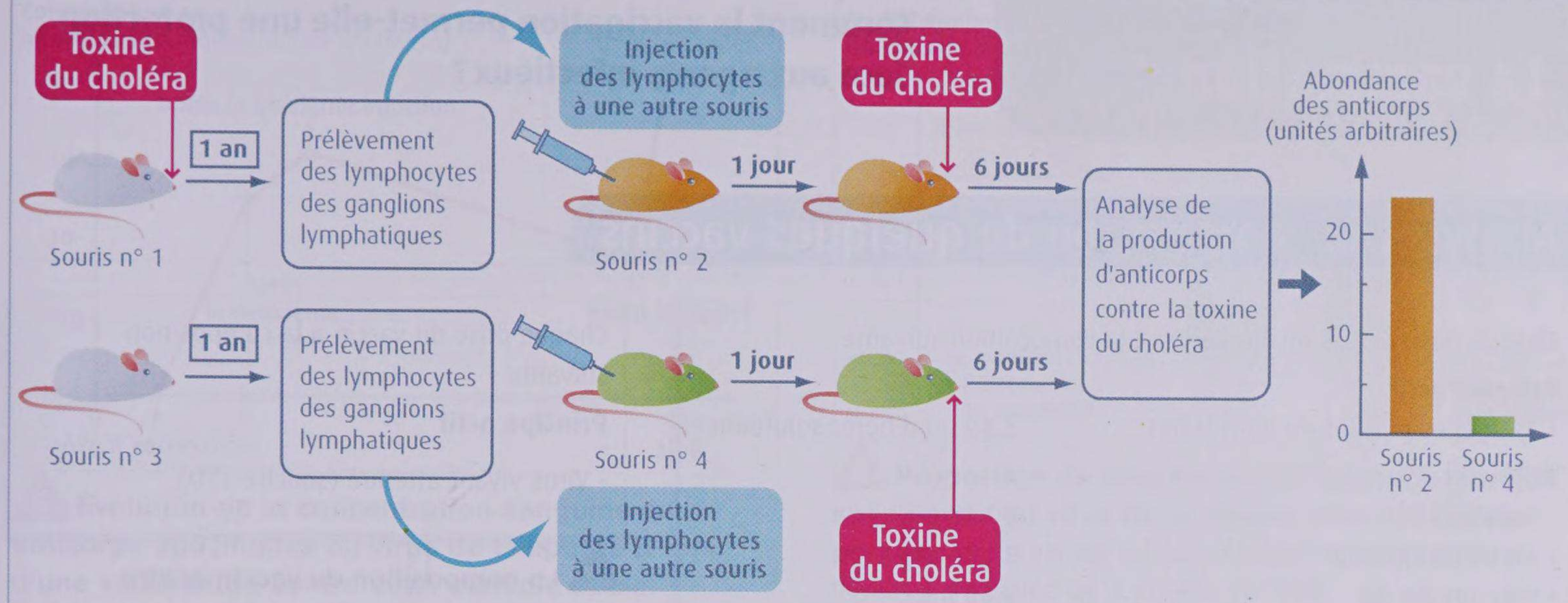
1 Comparaison de la réponse immunitaire adaptative contre le virus de la grippe chez des souris ayant ou non été déjà infectées. La réponse immunitaire est dite primaire chez les souris n'ayant jamais été infectées par le virus. Chez les souris ayant déjà été infectées, la réponse est dite secondaire.

On connaît différents types de virus grippaux, caractérisés chacun par leur hémagglutinine H et leur neuraminidase N (voir doc. 3 p. 285). Il existe en effet différents types de ces deux protéines d'enveloppe, identifiés chacun par un numéro. À ce jour, trois types de virus (H1N1, H2N2 et H3N2) ont été à l'origine de pandémies, c'est-à-dire d'épidémies de grippe lors desquelles une très forte proportion de la population mondiale a été infectée. La pandémie passée, ces virus ont ensuite recirculé, à l'origine des épidémies de grippe qui, chaque hiver, touchent 10 % de la population mondiale et tuent un million de personnes. D'une année sur l'autre, on observe une lente évolution des protéines antigéniques H et N, mais celles-ci restent du même type. Il est toutefois toujours possible qu'un virus pourvu de protéines H et N d'un type nouveau fasse son apparition et s'adapte à une transmission interhumaine. Un tel virus, qui n'aurait jamais été rencontré par notre système immunitaire, se répandrait rapidement dans la population, créant une nouvelle pandémie.

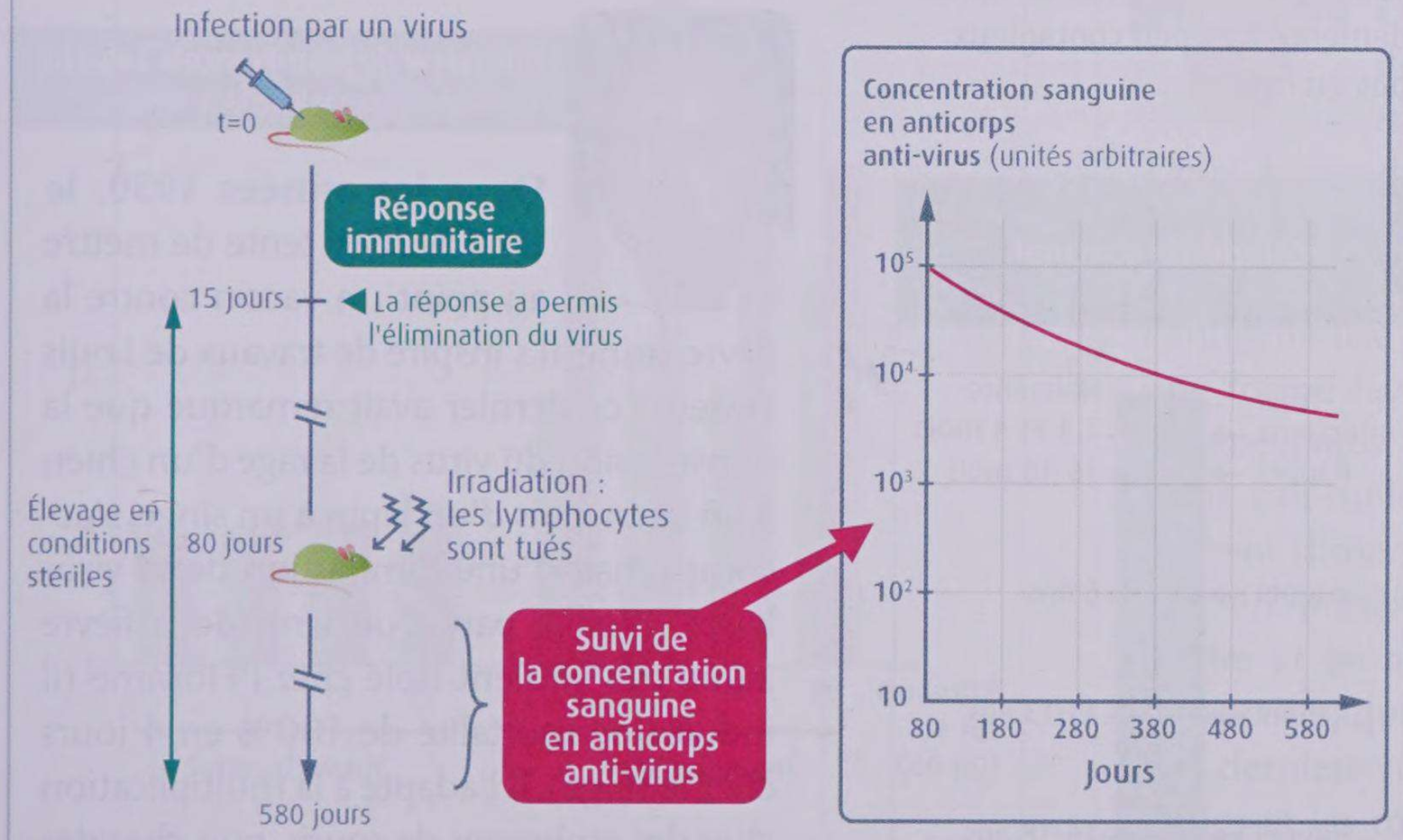
2 Les pandémies de grippe.

3 Un hôpital pendant la pandémie de « grippe espagnole » (1918-1919). En 1918-19, un virus grippal d'un type nouveau et particulièrement virulent a infecté près de 50 % de la population mondiale, causant la mort de 30 à 50 millions de personnes. En 2008, des études ont montré que le sang de certains survivants de cette pandémie contenait des anticorps spécifiques de ce virus.

Comprendre les mécanismes de la mémoire immunitaire



4 Une expérience de transfert de lymphocytes chez la souris. Les doses de toxine du choléra qu'ingèrent les souris ne sont pas mortelles. Avant la dernière étape de l'expérience, les souris n° 2, 3 et 4 n'ont jamais été en contact avec la bactérie responsable du choléra ou avec la toxine qu'elle produit.



5 Une expérience d'irradiation chez la souris. Les souris sont irradiées avec des rayons γ à une dose qui élimine tous les lymphocytes (T ou B). On rappelle que la durée de vie moyenne d'une souris est de 2 à 3 ans. On précise par ailleurs que les plasmocytes sont des cellules qui ne se divisent pas et sont donc très résistantes aux rayons γ.

Lors d'une réponse immunitaire, les lymphocytes T et les lymphocytes B dont l'anticorps membranaire ou le récepteur T reconnaît spécifiquement les antigènes portés par l'agent infectieux sont sélectionnés. Si certains d'entre entre eux se différencient en cellules effectrices à courte durée de vie (plasmocytes, lymphocytes T cytotoxiques ou auxiliaires), d'autres suivent une voie de différenciation différente : ils forment des lymphocytes T ou B dits mémoire, qui persistent dans l'organisme longtemps après l'élimination de l'agent infectieux et la fin de la réponse immunitaire.

6 Les lymphocytes mémoire.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Comparez les caractéristiques d'une réponse primaire et d'une réponse secondaire, puis les causes et les conséquences d'une épidémie grippale et d'une pandémie grippale ; déduisez-en l'existence d'une mémoire immunitaire.

2 **DOC. 1, 4 ET 6.** À partir de l'expérience du doc. 4, montrez l'existence de lymphocytes B mémoire et expliquez l'une des différences entre la réponse primaire et la réponse secondaire.

3 **DOC. 3 ET 5.** Analysez les résultats de l'expérience du doc. 5, puis expliquez un autre aspect de la mémoire immunitaire.

4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques et les mécanismes de la mémoire immunitaire.

UNITÉ 2

La vaccination

La réponse immunitaire contre un agent infectieux est plus rapide et plus intense lorsque l'organisme l'a déjà rencontré. Lors de la vaccination, l'Homme met à profit cette mémoire immunitaire.

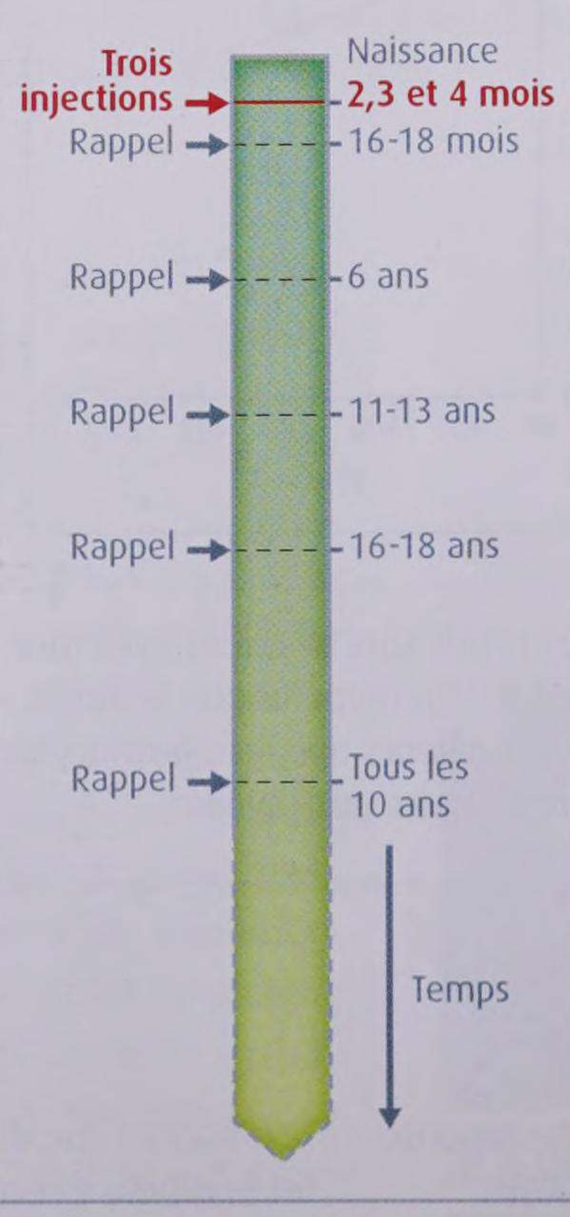
Comment la vaccination permet-elle une protection face aux agents infectieux ?

Analyser la composition de quelques vaccins

Chaque dose de 0,5 mL du vaccin a la composition suivante :

Principe actif	
• Antigènes purifiés du virus H5N1	3,80 µg d'hémagglutinine
Adjuvant	
• Squalène	10,68 mg
• Alpha-tocopherol	11,86 mg
• Polysorbate 80	4,86 mg

1 La composition du vaccin contre la « grippe aviaire ». En 2005, un virus grippal d'un type nouveau (H5N1 dit de la « grippe aviaire ») fait son apparition. Il est très pathogène, ce qui fait craindre l'imminence d'une pandémie de grippe (voir doc. 2 p. 306). Des recherches ont permis la mise au point d'un vaccin. Ce dernier induit une protection efficace après deux injections. Heureusement, le virus est demeuré très peu contagieux pour l'Homme et la pandémie redoutée n'a pas eu lieu.

Maladie	Agent pathogène	Principe actif du vaccin	Calendrier vaccinal
Diphtérie Tétanos	Bactérie (sécrétion d'une toxine)	Anatoxine et protéines de membrane de la bactérie	
Polyomyélite	Virus (infection du tube digestif et du système nerveux)	Virus tué	

3 Le vaccin « DT polio ». La vaccination contre la diphtérie, le tétanos et la poliomyélite est obligatoire en France. Elle peut être effectuée grâce à un vaccin unique. Une anatoxine est une toxine traitée par une substance chimique (formaldéhyde) de sorte qu'elle a perdu sa toxicité. Cette même substance permet de tuer facilement nombre de virus.

Chaque dose du vaccin a la composition suivante :

Principe actif
• Virus vivant atténué (souche 17D)

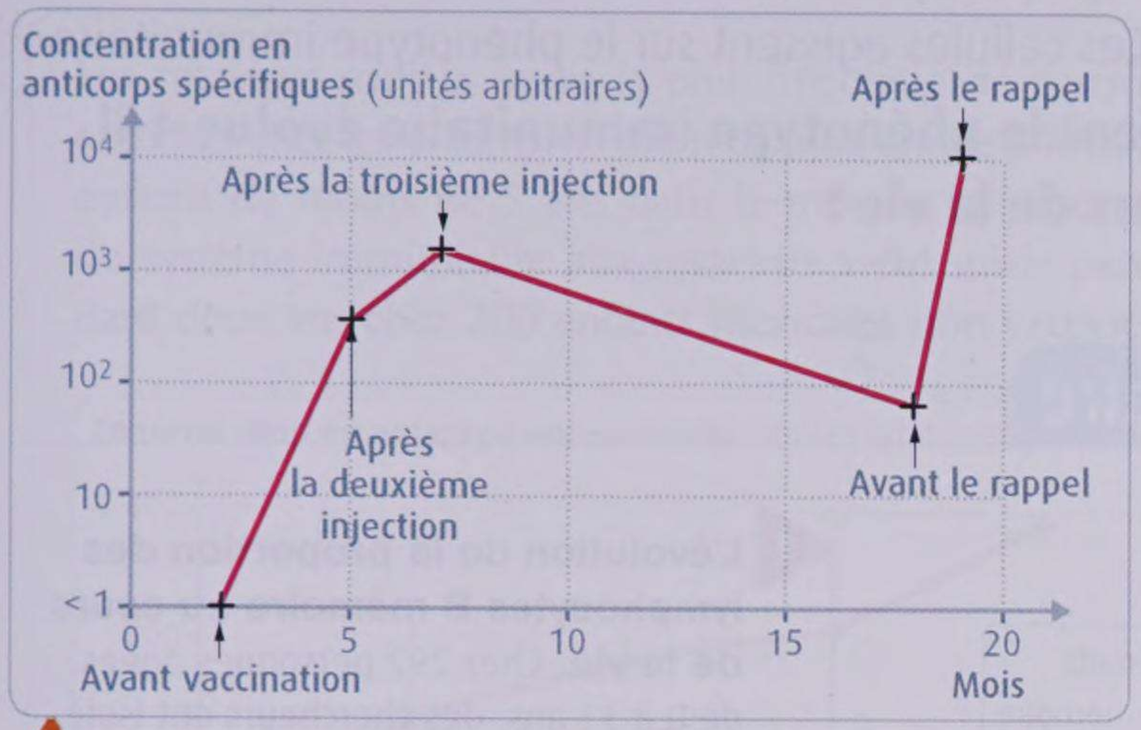
2 La composition du vaccin contre la fièvre jaune. Cette fièvre hémorragique virale est transmise par la piqûre d'un moustique. Les voyageurs qui se rendent dans les zones où elle sévit doivent se faire vacciner avant leur départ.

Interview de **Jean-François Saluzzo**, virologiste spécialiste des vaccins

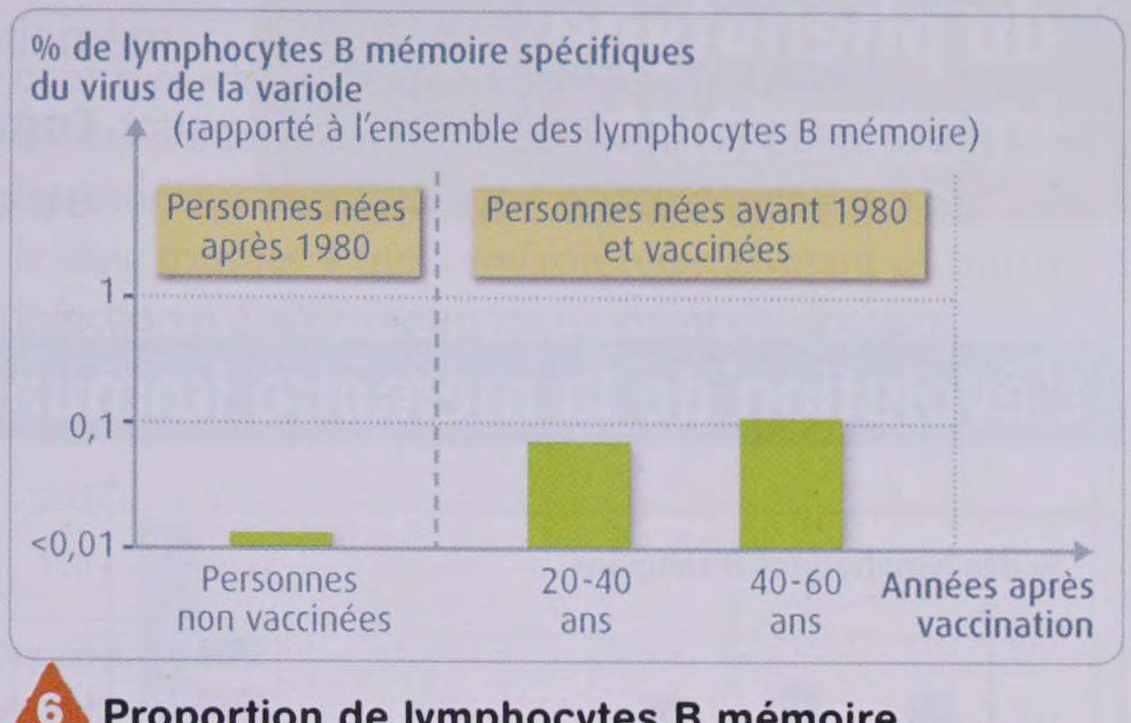
Dans les années 1930, le Dr Theiller tente de mettre au point un vaccin contre la fièvre jaune. Il s'inspire de travaux de Louis Pasteur : ce dernier avait remarqué que la transmission du virus de la rage d'un chien à un lapin, puis d'un lapin à un singe, s'accompagnait d'une diminution de sa virulence. Theiller part d'un virus de la fièvre jaune très virulent isolé chez l'Homme (il induit une mortalité de 100 % en 4 jours chez le singe). Il l'adapte à la multiplication chez des embryons de souris, puis chez des embryons de poulets. Après plus de 80 transferts d'un hôte à un autre, il obtient une souche virale (dite « 17D ») qui se multiplie chez le singe sans provoquer la fièvre jaune. Ce virus, aujourd'hui encore, est utilisé dans le vaccin fièvre jaune. Vivant, il se multiplie dans l'organisme de la personne vaccinée et induit une réponse immunitaire très efficace après une seule dose vaccinale. Pourquoi a-t-il perdu sa virulence ? Cela reste un mystère… On sait juste que le virus a subi 68 mutations au cours du processus d'adaptation.

4 L'histoire du vaccin contre la fièvre jaune.

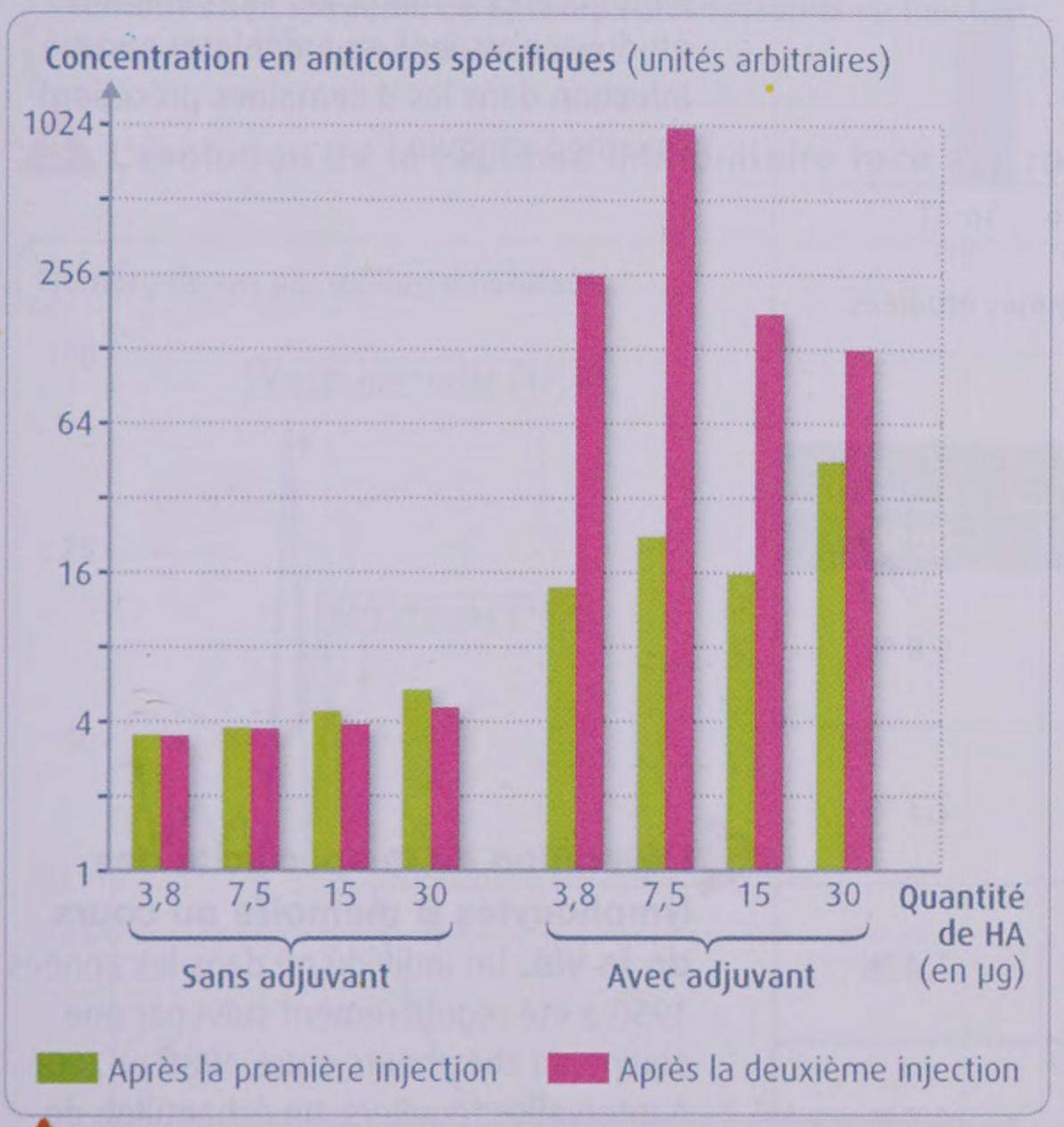
Comprendre le mode d'action des vaccins



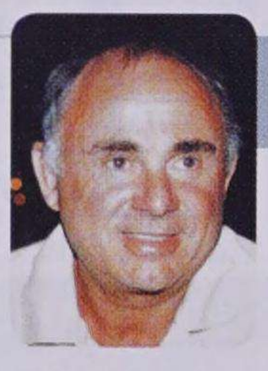
5 Évolution de la concentration sanguine en anticorps spécifiques du virus de l'hépatite B lors d'une vaccination contre cette maladie virale.



6 Proportion de lymphocytes B mémoire spécifiques du virus de la variole chez différentes personnes. La variole est une maladie virale qui a été déclarée éradiquée de la planète en 1980.



7 Concentration sanguine en anticorps spécifiques du virus de la « grippe aviaire » après différents essais de vaccination. Les vaccins testés sont constitués d'une quantité variable d'hémagglutinine (HA) purifiée du virus à laquelle a, ou non, été ajoutée un adjuvant (voir ci-contre).



Interview de **Jean-François Saluzzo,** virologiste spécialiste des vaccins

Les adjuvants sont présents dans de nombreux vaccins ne comprenant pas d'agent infectieux vivant.

Deux types d'adjuvants sont aujourd'hui utilisés. Leur mécanisme d'action reste mal connu. Les sels d'aluminium agissent par dépôt au site d'injection : l'antigène fixé sur le sel diffuse lentement et prend une forme favorable à sa présentation aux cellules phagocytaires. Second type d'adjuvants : les émulsions eau-huile à base de squalène, qui sont rapidement dispersées au site d'inoculation. L'émulsion agit en présentant l'antigène au système immunitaire et en activant les fibres musculaires au site d'injection, qui produisent des immunomédiateurs. Ces derniers vont alors stimuler les cellules dendritiques et les macrophages. On a donc une réaction en cascade et non pas une action passive, comme dans le cas des sels d'aluminium. Conséquence : les effets secondaires des émulsions sont généralement plus marqués (douleurs, fièvre passagère).

8 Qu'est ce qu'un adjuvant ?

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Justifiez le fait que l'on classe les vaccins en deux catégories : vaccins vivants atténués et vaccins inertes.

2 **DOC. 5 ET 6.** Expliquez comment un vaccin peut induire une protection de l'organisme face à un agent infectieux.

3 **DOC. 7 ET 8.** Décrivez l'effet de l'adjuvant sur le vaccin contre la « grippe aviaire », puis expliquez les résultats observés.

4 **DOC. 3, 4, 7 ET 8.** Présentez quelques avantages et inconvénients de chaque catégorie de vaccins.

5 **EN CONCLUSION.** Récapitulez les caractéristiques et le mode d'action des vaccins.

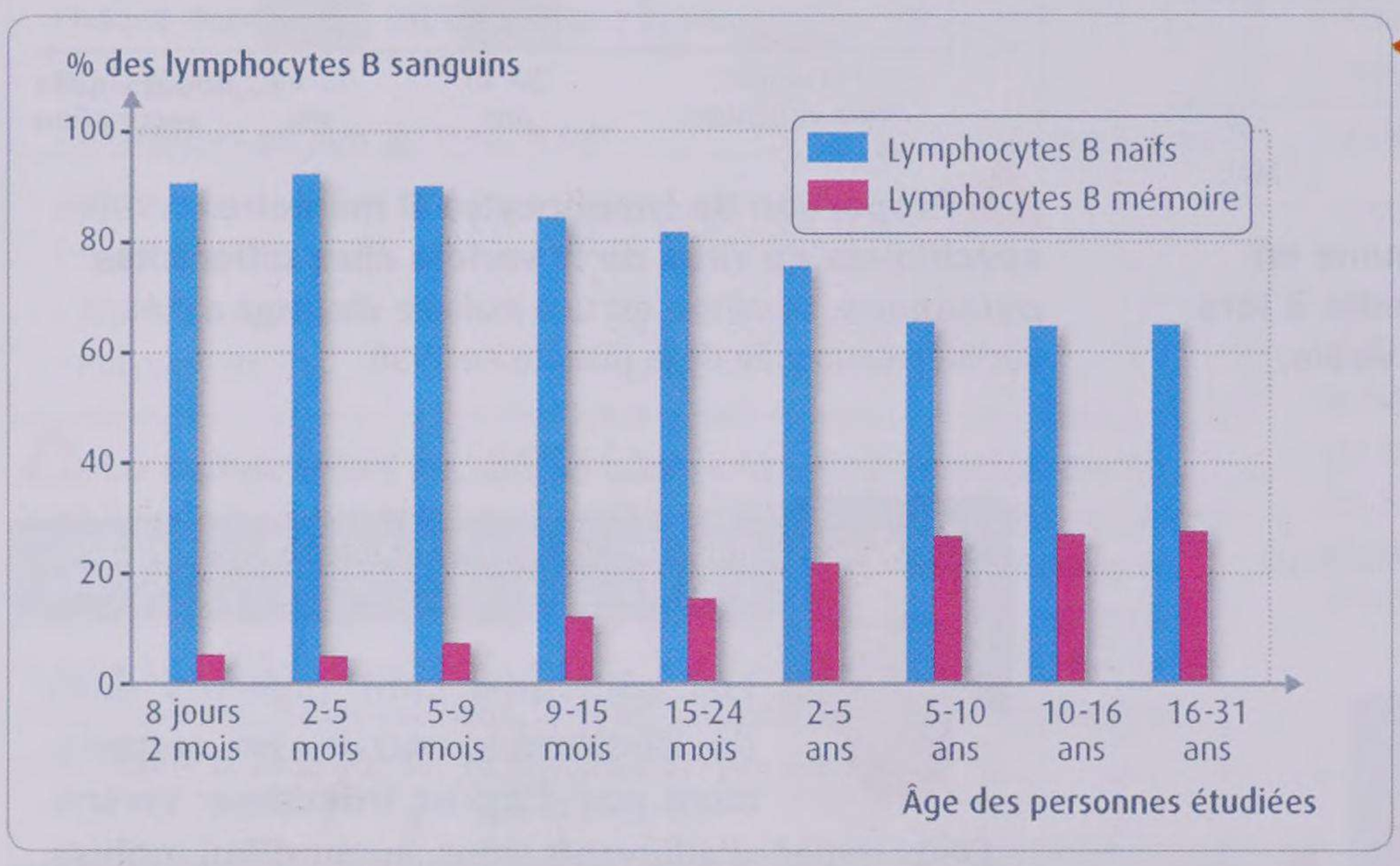
UNITÉ 3

L'évolution du phénotype immunitaire

Lors d'une vaccination ou d'une rencontre naturelle avec un agent infectieux, le système immunitaire d'un individu produit des lymphocytes mémoire et des plasmocytes mémoire. Ces cellules agissent sur le phénotype immunitaire.

Comment le phénotype immunitaire évolue-t-il au cours de la vie ?

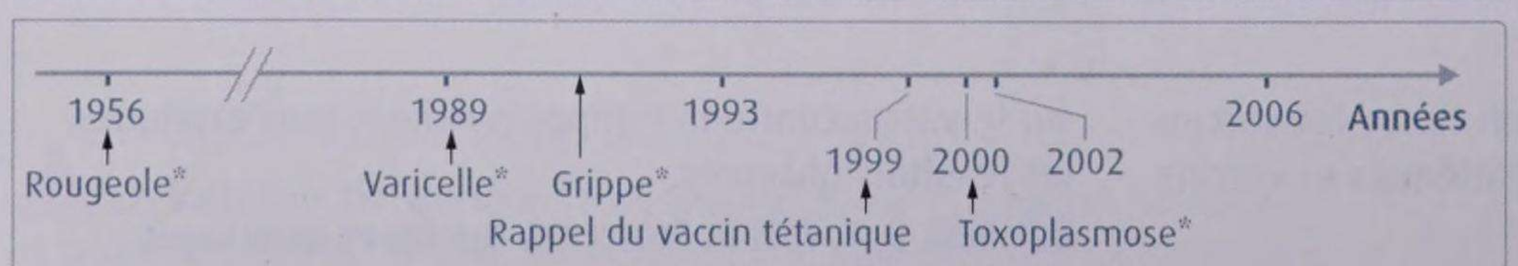
L'évolution de la mémoire immunitaire



1 L'évolution de la proportion des lymphocytes B mémoire au cours de la vie. Chez 292 personnes âgées de 0 à 31 ans, des chercheurs ont isolé les lymphocytes B sanguins, puis ils ont déterminé la proportion de lymphocytes B naïfs (n'ayant jamais rencontré l'antigène susceptible d'être reconnu par leur anticorps membranaire) et de lymphocytes B mémoire. Les personnes étudiées n'avaient eu à déplorer aucune infection dans les 4 semaines précédent l'examen sanguin.

Spécificité des lymphocytes B	Année de prélèvement			
	1989	1993	2002	2006
Virus de la rougeole	3,2 %	2,9 %	4,8 %	5,8 %
Toxine tétanique	1 %	0,6 %	2,6 %	2,3 %
Virus de la varicelle	24 %	4,2 %	2,2 %	1,4 %
Virus de la grippe	0 %	0,2 %	0,6 %	0,5 %
Parasite de la toxoplasmose	0 %	0 %	8,3 %	0,8 %
Non déterminée	71,8 %	92,1 %	81,5 %	89,7 %

2 L'évolution de la spécificité des lymphocytes B mémoire au cours de la vie. Un individu né dans les années 1950 a été régulièrement suivi par une équipe de chercheurs entre 1989 et 2006. À intervalles réguliers, un échantillon de ses lymphocytes B sanguins a été prélevé. Les lymphocytes B mémoire ont été isolés puis les chercheurs ont recherché la présence de lymphocytes dont l'anticorps membranaire reconnaît spécifiquement des antigènes portés ou sécrétés par certains agents infectieux : virus de la varicelle, virus de la rougeole, virus de la grippe, parasite *Toxoplasma gondii*, bactérie *Clostridium tetani* (antigène reconnu : toxine tétanique). Ils ont évalué la proportion de ces différents lymphocytes B mémoire parmi l'ensemble des lymphocytes B mémoire. À sa naissance, l'individu a été vacciné, entre autres, contre le tétanos.

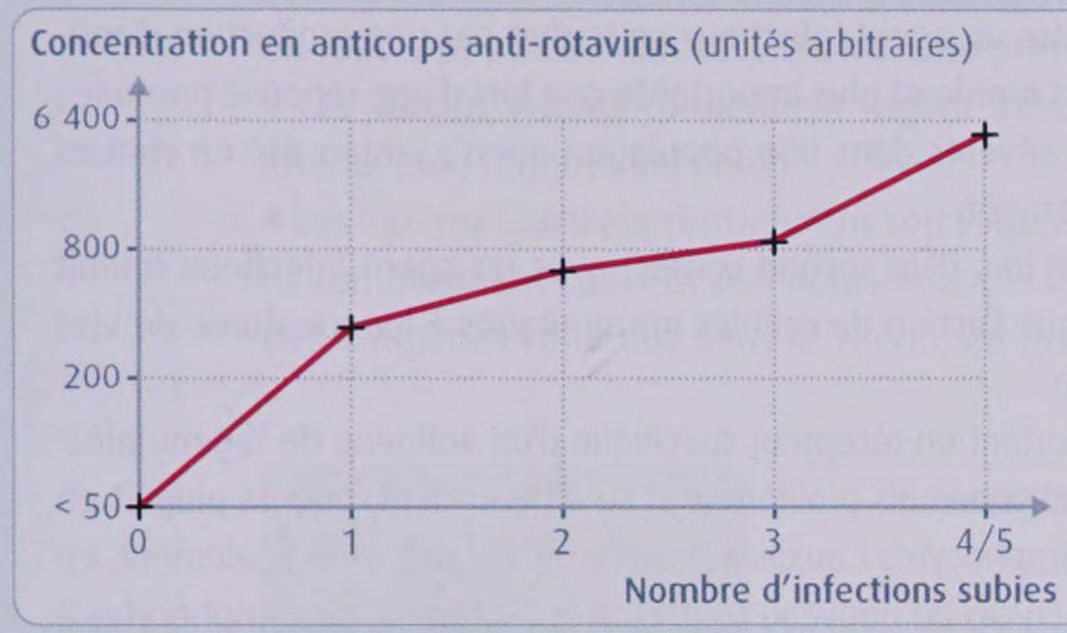


Quelques vaccinations et maladies contractées par l'individu étudié.

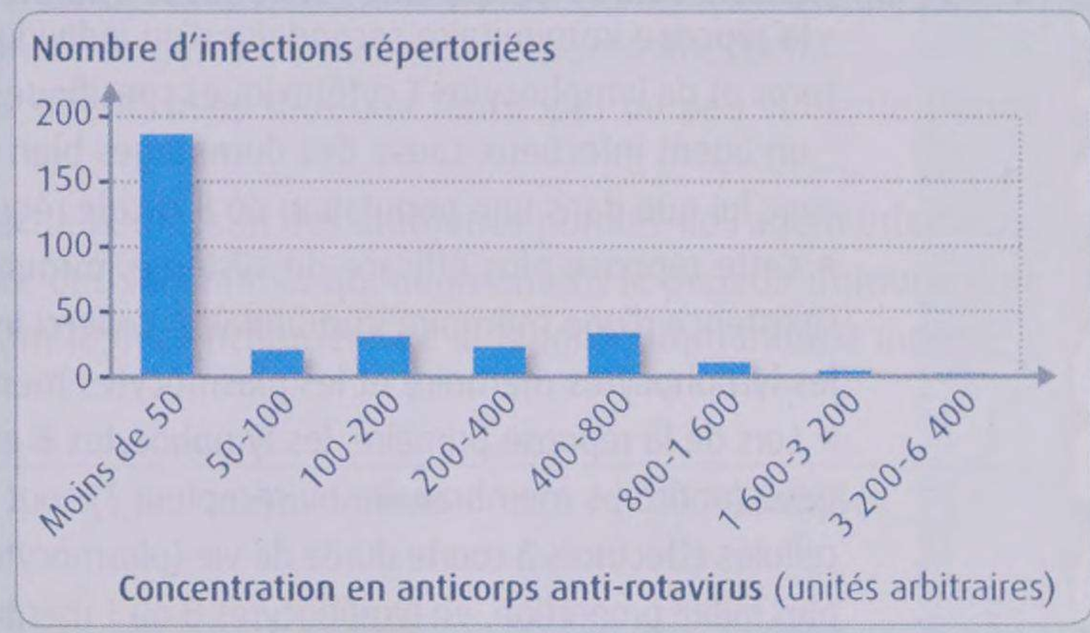
* Maladie contractée

L'évolution de la réponse aux agents infectieux

Les rotavirus sont la cause la plus fréquente de gastro-entérites chez les enfants. Ils tuent chaque année 500 000 enfants de moins de 5 ans dans le monde. La réponse du système immunitaire aux rotavirus a été suivie pendant deux ans chez 200 enfants mexicains non vaccinés contre ce virus. Chaque semaine, ils ont été auscultés et les cas d'infections à rotavirus répertoriés ; parallèlement, les anticorps spécifiques des rotavirus ont été dosés dans le sang tous les 4 mois environ (en s'assurant qu'aucune infection n'était en cours au moment du dosage).

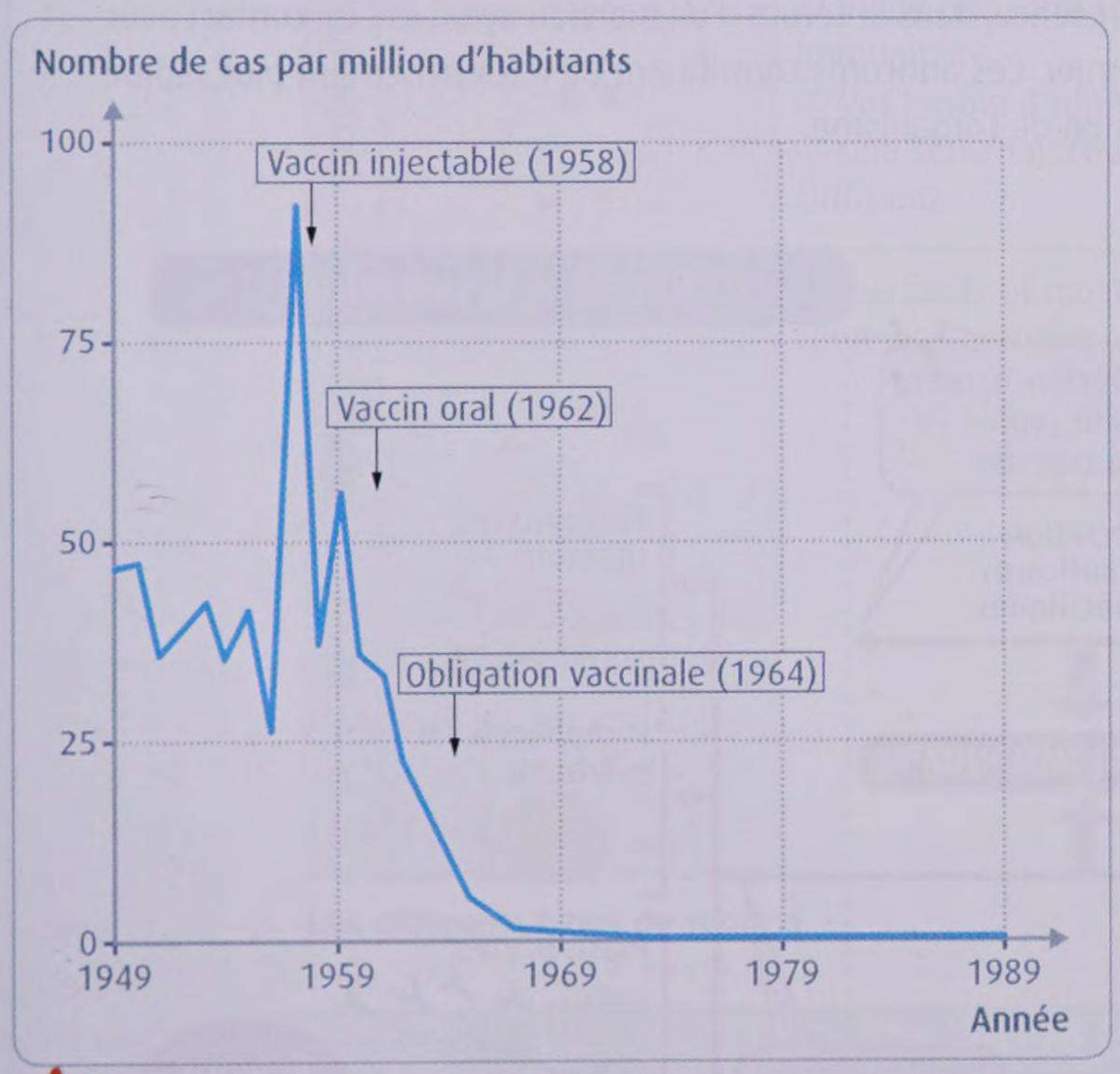


Concentration sanguine en anticorps anti-rotavirus en fonction du nombre d'infections déjà subies.



Nombre d'infections répertoriées en fonction de la concentration sanguine en anticorps anti-rotavirus avant infection.

3 L'évolution de la réponse immunitaire face aux rotavirus.



4 L'évolution de l'incidence de la poliomyélite en France depuis 1949.

5 Une séance de vaccination contre la poliomyélite en Chine lors des « Journées nationales de vaccination ».
Ces journées font partie du programme d'éradication des virus de la poliomyélite mis en place par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 1988. En Chine et en Inde, au début des années 2000, elles ont permis la vaccination de 230 millions d'enfants de moins de 5 ans. En 1988, on a compté plus de 350 000 cas de poliomyélite dans le monde. En 2009, 1 604 cas ont été recensés.

ACTIVITÉS

TÂCHE COMPLEXE

À partir des documents de la double page, décrivez l'évolution du phénotype immunitaire au cours de la vie et expliquez les conséquences de cette évolution pour un individu et pour une population.

Pour cela, vous pouvez :
- caractériser l'évolution quantitative et qualitative des lymphocytes mémoire au cours de la vie **(DOC. 1 ET 2)**.
- montrer que l'évolution du phénotype immunitaire, soit naturelle, soit sous l'effet des vaccins, confère une protection à différentes échelles **(DOC. 3 À 5)**.

CHAPITRE 3 Le phénotype immunitaire

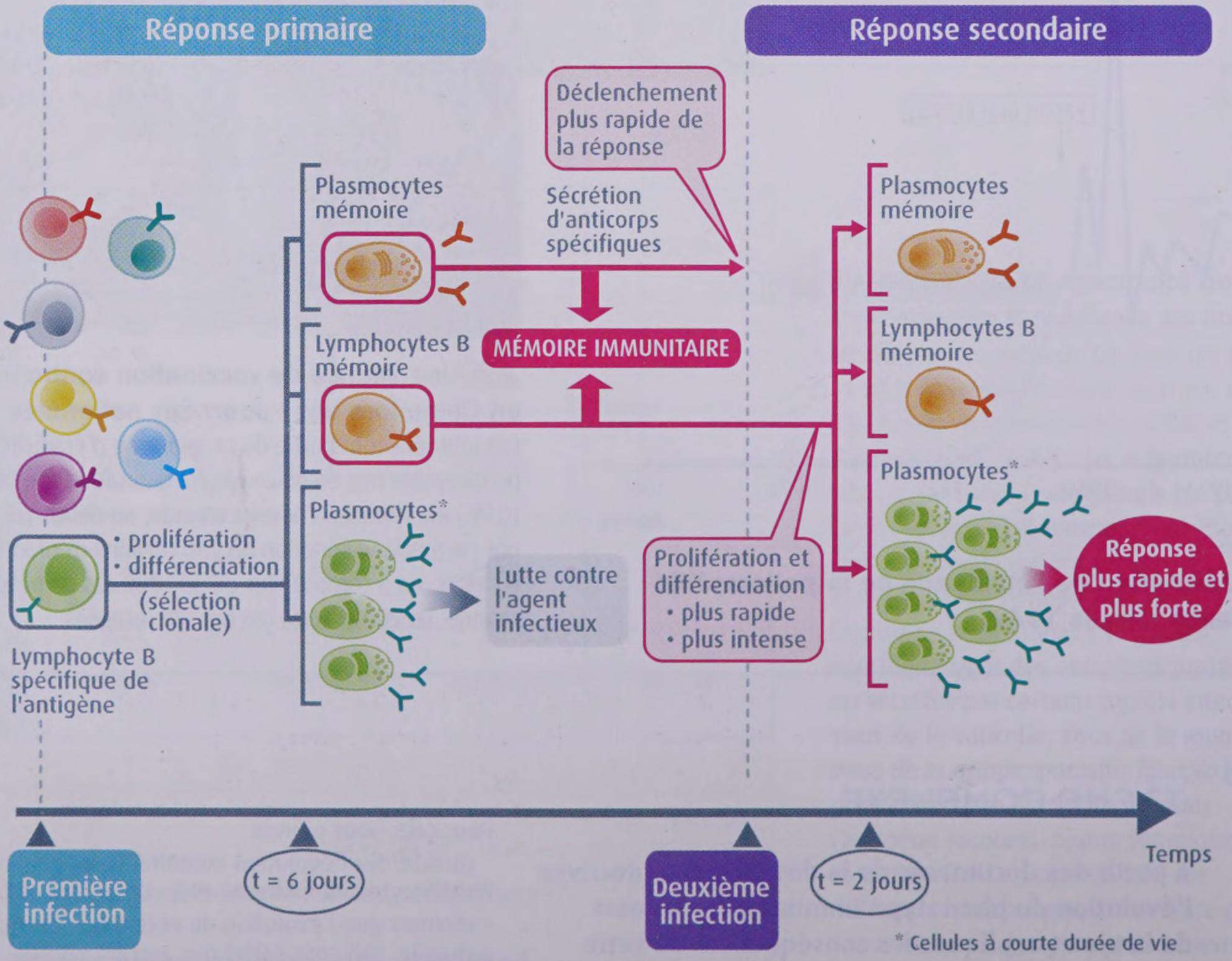
UNITÉ 1 La mémoire immunitaire

• Le système immunitaire répond plus efficacement lorsqu'il rencontre un agent infectieux pour la seconde fois (réponse secondaire) que lorsqu'il est en contact avec lui pour la première fois (réponse primaire). Ainsi :
– la réponse immunitaire secondaire d'un individu contre un agent infectieux se traduit par une production d'anticorps et de lymphocytes T cytotoxiques spécifiques plus rapide et plus importante que lors d'une réponse primaire ;
– un agent infectieux cause des dommages bien plus sévères dans une population qui n'a jamais été en contact avec lui que dans une population où il circule régulièrement.

• Cette réponse plus efficace du système immunitaire lors d'un second contact avec un agent infectieux traduit l'existence d'une mémoire immunitaire. Celle-ci implique l'action de cellules immunitaires à longue durée de vie : les lymphocytes mémoire et les plasmocytes mémoire.

• Lors de la réponse primaire, les lymphocytes B et T portant un récepteur spécifique d'un antigène de l'agent infectieux (anticorps membranaire ou récepteur T) sont sélectionnés : ils prolifèrent et se différencient, pour la plupart en cellules effectrices à courte durée de vie (plasmocytes, lymphocytes T auxiliaires ou cytotoxiques), mais également, en plus faible proportion, en lymphocytes B ou T mémoire. En cas de nouveau contact avec l'antigène, ces lymphocytes à longue durée de vie prolifèrent plus intensément que des lymphocytes naïfs et ils se différencient plus rapidement en cellules effectrices spécifiques de l'antigène, assurant ainsi une protection de l'organisme vis-à-vis de l'agent infectieux (si toutefois les antigènes que porte cet agent infectieux ne varient pas de manière importante au cours du temps).

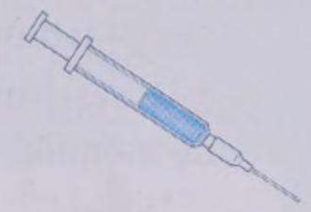
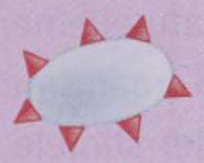
• Certains effecteurs formés lors de la réponse primaire sont conservés après élimination de l'agent infectieux. Il s'agit des plasmocytes mémoires, qui expliquent la présence, dans le sérum d'un individu ayant été en contact avec un agent infectieux, d'anticorps spécifiques de ce dernier. Ces anticorps contribuent au déclenchement plus rapide de la réponse immunitaire secondaire et à la protection de l'organisme.



Mémoire immunitaire et production d'anticorps lors de deux rencontres successives avec le même agent infectieux.

UNITÉ 2 La vaccination

- La vaccination consiste à inoculer à un individu des antigènes d'un agent infectieux sous une forme immunogène (elle déclenche une réaction immunitaire innée puis adaptative), mais non virulente (elle ne provoque pas de maladie).
- La réaction immunitaire induite par la vaccination permet la production de lymphocytes et de plasmocytes mémoire spécifiques des antigènes de l'agent infectieux. Aussi, lorsque l'individu vacciné rencontre ce dernier sous une forme virulente, c'est une réponse immunitaire secondaire, plus rapide et plus intense, qui se met en route. La vaccination assure ainsi une protection de l'organisme vis-à-vis de l'agent infectieux.
- Les vaccins vivants contiennent l'agent infectieux vivant, mais sous une forme pas ou peu virulente (forme atténuée de l'agent infectieux).
- Les vaccins inactivés contiennent soit l'agent infectieux tué, soit des antigènes purifiés de l'agent infectieux. Ils comprennent souvent des adjuvants, c'est-à-dire des substances qui augmentent le pouvoir immunogène des antigènes contenus dans le vaccin, en favorisant le déclenchement de la réponse immunitaire innée.

Principe actif du vaccin		Avantages (+)	Inconvénients (−)	Exemples 
Vaccins vivants	Agent infectieux atténué 	• Se multiplie dans l'organisme vacciné ➪ induit une forte réponse immunitaire ➪ Pas besoin d'adjuvant ➪ Une seule injection est suffisante	• L'obtention d'une souche atténuée est un processus long et sans garantie de succès ➪ il n'y a pas de souche atténuée pour certains pathogènes	• Vaccin contre la fièvre jaune (virus atténué) • Vaccin contre la tuberculose (bactéries atténuées).
Vaccins inertes	Agent infectieux tué	• Plus facile et moins coûteux à préparer	• Les agents infectieux tués ou les antigènes purifiés sont moins immunogènes que les agents infectieux atténués ➪ Nécessité fréquente d'un adjuvant ➪ Nécessité de plusieurs injections et de rappels	• Vaccin contre le choléra (bactéries tuées) • Vaccin contre l'hépatite A (virus tués) • Vaccin contre le tétanos (anatoxine : forme inactivée de la toxine produite par la bactérie) • Vaccin contre l'hépatite B (protéines de membrane du virus produites par génie génétique)
	Antigènes purifiés de l'agent infectieux			

Les différents types de vaccins.

UNITÉ 3 L'évolution du phénotype immunitaire

- Tout au long de sa vie, un individu rencontre une multitude d'agents infectieux. À chaque rencontre qui a déclenché une réponse immunitaire, des lymphocytes et des plasmocytes mémoire sont produits. La proportion de ces cellules mémoire et l'étendue des types d'antigènes reconnus augmentent donc avec l'âge. Le phénotype immunitaire d'un individu évolue ainsi au fur et à mesure des infections et des vaccinations.
- Parce qu'elles permettent la production de cellules immunitaires à longue durée de vie, les rencontres naturelles ou artificielles avec les agents infectieux confèrent une protection à leur encontre. Cette protection est observable à l'échelle de l'individu (moindre risque d'infection par un virus lorsque l'on a déjà été infecté par ce dernier) et de la population (diminution de l'incidence d'une maladie induite par la vaccination). Cela traduit l'adaptation du phénotype immunitaire à l'environnement.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 3

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

L'essentiel par le texte

Le phénotype immunitaire d'un individu caractérise sa capacité à répondre aux agents infectieux qu'il peut rencontrer.

La mémoire immunitaire

• Lorsqu'un agent infectieux déclenche une réponse immunitaire adaptative, certains lymphocytes spécifiques qui s'engagent dans le processus de sélection clonale se différencient en cellules à longue durée de vie : les **lymphocytes mémoire**. En cas de second contact avec le même agent infectieux, ces lymphocytes mémoire prolifèrent plus intensément que des lymphocytes naïfs et se différencient plus vite en cellules effectrices spécifiques de l'agent infectieux. La réponse adaptive, dite **réponse secondaire**, est alors plus rapide et plus intense. Elle assure généralement une protection de l'organisme vis-à-vis de l'agent infectieux. En outre, certains effecteurs produits lors du premier contact avec l'agent infectieux sont conservés après élimination de ce dernier : il s'agit des **plasmocytes mémoire**. Les anticorps qu'ils sécrètent contribuent à la protection de l'organisme.

• Le système immunitaire répond ainsi plus efficacement à un agent infectieux qu'il a déjà rencontré : on parle de mémoire immunitaire.

Mémoire immunitaire et vaccination

• La **vaccination** consiste à inoculer à un individu un agent infectieux tué ou atténué, ou bien des antigènes purifiés de ce dernier. Ces produits déclenchent la production de cellules mémoire spécifiques (ils sont immunogènes), mais sont non pathogènes. Si l'individu vacciné rencontre ensuite naturellement l'agent infectieux, la mise en route d'une réponse immunitaire secondaire assure la protection de l'organisme.

• Il est parfois nécessaire d'ajouter un **adjuvant** à certains vaccins. Ce dernier stimule la mise en route de la réponse innée, indispensable à l'installation de la réponse adaptative.

L'évolution du phénotype immunitaire

• Tout au long de sa vie, un individu rencontre de multiples antigènes, soit lors de vaccinations, soit lors d'infections naturelles. À chacune de ces rencontres, la proportion des cellules mémoire présentes dans l'organisme et le nombre d'antigènes qu'elles peuvent spécifiquement reconnaître augmentent.

• Le phénotype immunitaire d'un individu évolue ainsi au gré des expositions aux antigènes et permet son adaptation à l'environnement.

Les capacités et attitudes

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations pour mettre en évidence la mémoire immunitaire et ses bases cellulaires **(unité 1)**

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations sur la composition d'un vaccin et son mode d'emploi **(unité 2)**

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations pour comprendre l'adaptation du système immunitaire d'un organisme à son environnement **(unité 3)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Adjuvant : substance augmentant le pouvoir immunogène des antigènes contenus dans un vaccin.

Lymphocyte mémoire : lymphocyte à longue durée de vie spécifique d'un antigène produit lors d'une réponse adaptative. Lors d'une nouvelle rencontre avec l'antigène, il se différencie plus efficacement en cellule effectrice qu'un lymphocyte naïf.

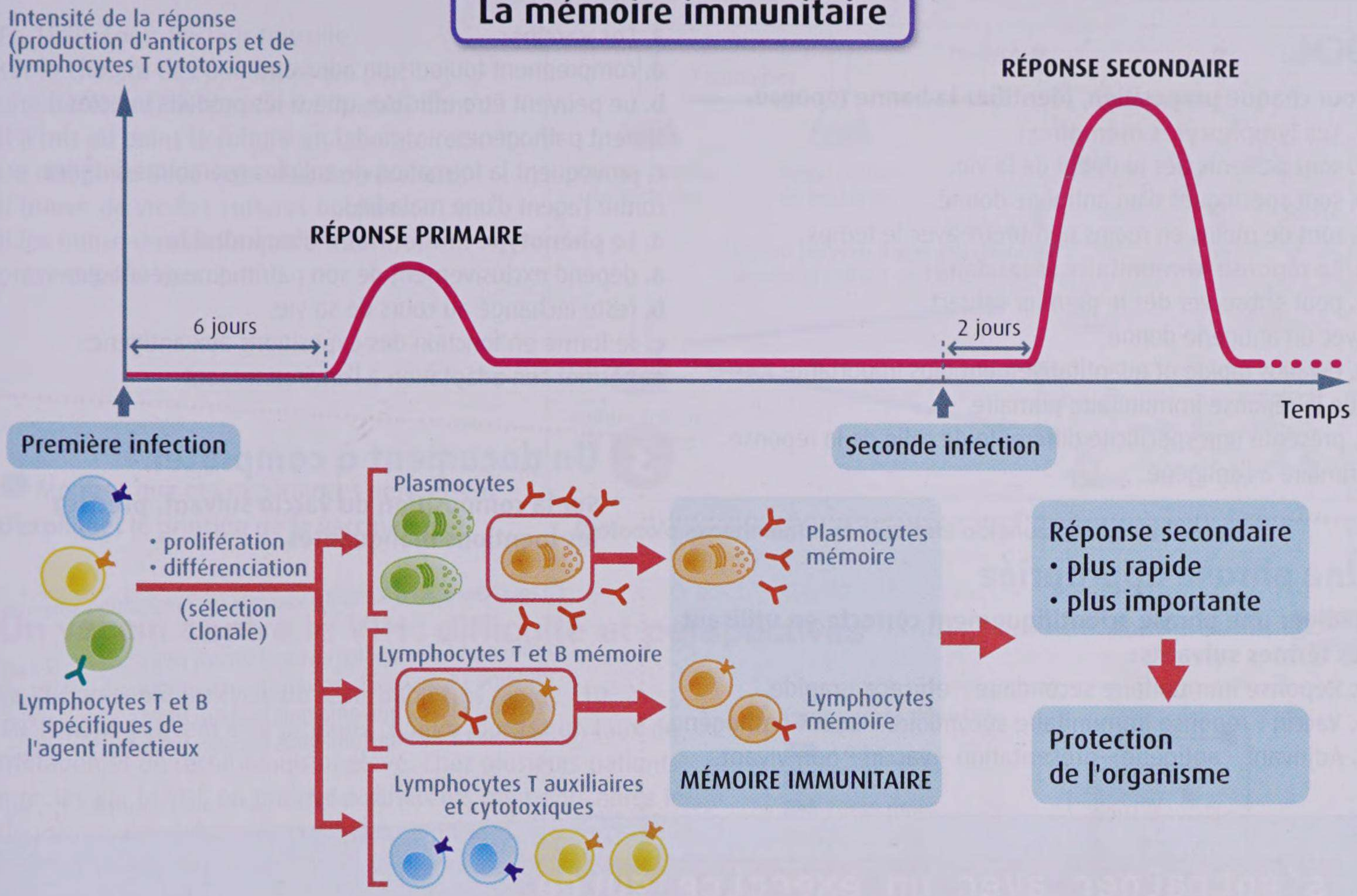
Plasmocyte mémoire : cellule effectrice conservée après une réponse adaptative, expliquant la présence d'anticorps spécifiques dans le sang d'un individu ayant été en contact avec un agent infectieux.

Réponse immunitaire secondaire : réponse adaptative produite par l'organisme lors d'un contact avec un antigène qu'il a déjà rencontré.

Vaccination : injection d'antigènes sous une forme immunogène, mais non pathogène.

L'essentiel par l'image

La mémoire immunitaire



Vaccination et évolution du phénotype immunitaire

EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la bonne réponse.

1. Les lymphocytes mémoires :

a. sont présents dès le début de la vie.

b. sont spécifiques d'un antigène donné.

c. sont de moins en moins nombreux avec le temps.

2. La réponse immunitaire secondaire :

a. peut s'observer dès le premier contact avec un antigène donné.

b. est plus rapide et quantitativement plus importante que la réponse immunitaire primaire.

c. présente une spécificité différente de celle de la réponse primaire à l'antigène.

3. Les vaccins :

a. comprennent toujours un adjuvant.

b. ne peuvent être efficaces que si les produits injectés restent pathogènes.

c. provoquent la formation de cellules mémoires dirigées contre l'agent d'une maladie.

4. Le phénotype immunitaire d'un individu :

a. dépend exclusivement de son patrimoine génétique.

b. reste inchangé au cours de sa vie.

c. se forme en fonction des expositions aux antigènes et permet son adaptation à l'environnement.

2 Une phrase appropriée

Rédiger une phrase scientifiquement correcte en utilisant les termes suivants :

a. Réponse immunitaire secondaire - efficace - rapide.

b. Vaccin - réponse immunitaire secondaire - agent pathogène.

c. Adjuvant - antigène - présentation - vaccin - non vivant.

3 Un document à compléter

Sur la composition du vaccin suivant, précisez les mentions manquantes.

Chaque dose de 0,5 mL du vaccin a la composition suivante :

_____ :

- Protéine L1 de Papillomavirus humain HPV6 — 20 µg
- Protéine L1 de Papillomavirus humain HPV1 — 40 µg
- Protéine L1 de Papillomavirus humain HPV16 — 40 µg
- Protéine L1 de Papillomavirus humain HPV18 — 20 µg

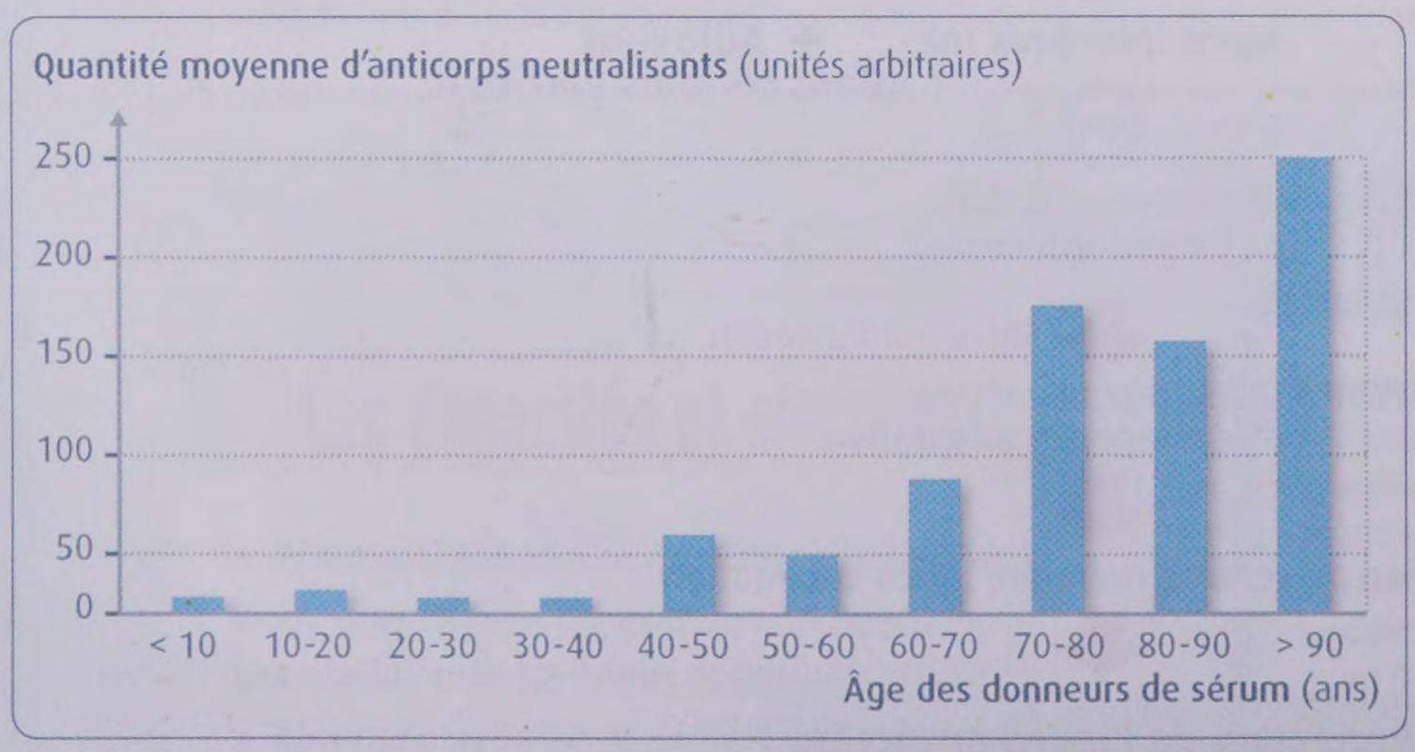
_____ :

- Sulfate d'hydroxyphosphate d'aluminium amorphe 225 µg

s'entraîner avec un exercice guidé

4 Une « mémoire grippale »

En 2009, une nouvelle souche du virus de la grippe, la souche H1N1/09 est apparue et s'est rapidement répandue à travers le monde, causant une épidémie grippale. Cette grippe a été particulièrement agressive chez les jeunes enfants. Lors de l'étude présentée ici, on a testé la capacité de sérums prélevés à Taïwan en 2008 (avant l'émergence de la pandémie), à neutraliser le virus H1N1/09.



1. Évolution de la quantité d'anticorps neutralisants contre H1N1/09 dans le sérum des donneurs en fonction de leur âge. 228 sérums ont été étudiés (donneurs nés entre 1917 et 2008).

QUESTION Montrez que cette étude met en évidence l'existence d'une mémoire immunitaire et proposez une hypothèse expliquant la virulence particulière de la souche H1N1/09 contre les jeunes enfants.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

Décrivez l'évolution de la quantité des anticorps neutralisants en fonction de l'âge des individus donneurs de sérum.

• Mobiliser ses connaissances

– Décrivez comment le taux d'anticorps spécifiques évolue après un contact avec un antigène (vaccin, infection).

– Rappelez comment évolue le phénotype immunitaire au cours de la vie.

• Raisonner et conclure

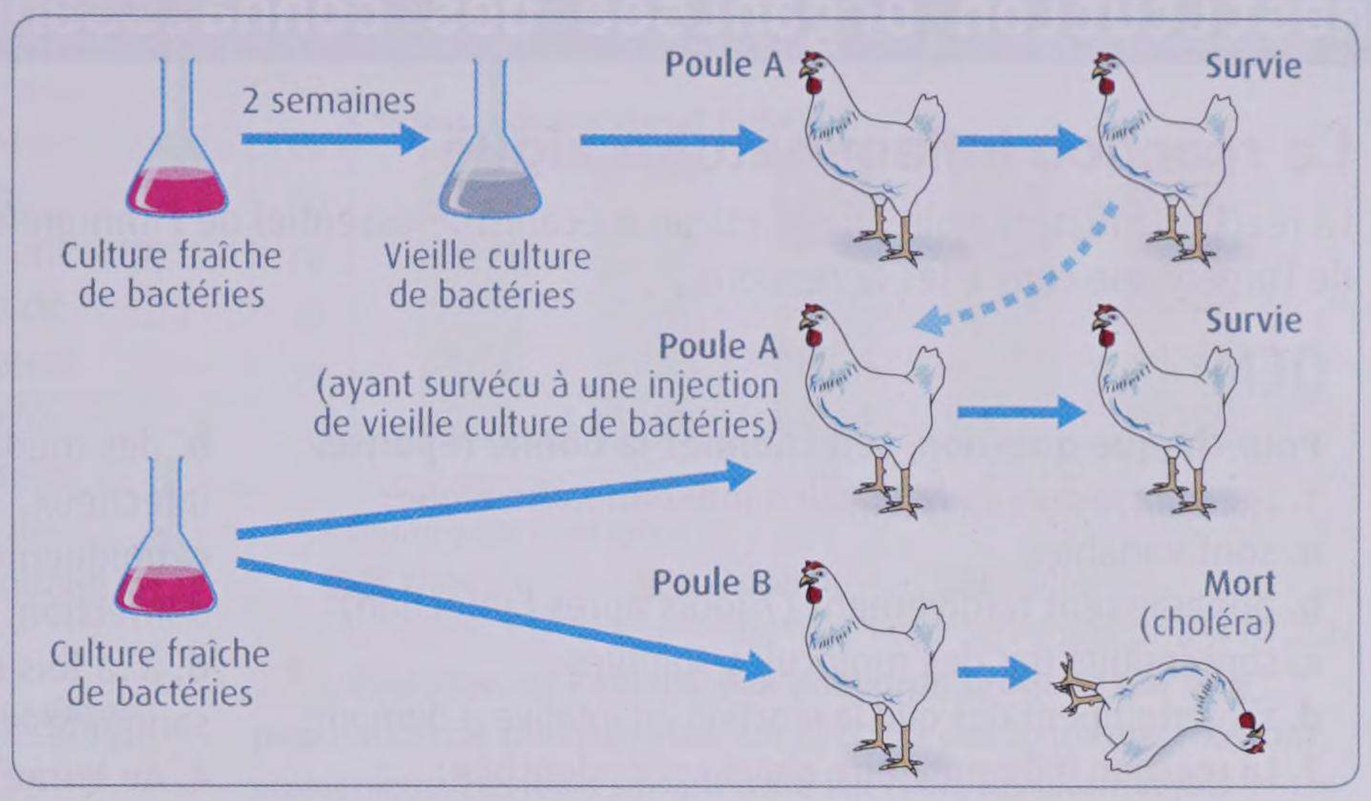
– Proposez une hypothèse sur l'histoire immunitaire des individus d'âge supérieur à 60 ans et expliquez les différences observées en fonction de l'âge.

– Expliquez l'agressivité du virus contre les personnes plus jeunes.

5 Une expérience historique de Louis Pasteur

Analyser une expérience

En 1880, Louis Pasteur travaille sur le cholera des poules, causé par une bactérie (*Pasteurella multocida*) dont il a mis au point la culture en laboratoire. De retour de deux semaines de vacances, il trouve de vieilles cultures oubliées. Il les utilise dans les expériences présentées ci-contre.



1. Protocole expérimental et résultats obtenus par Louis Pasteur.

● Montrez que ces expériences permettent d'expliquer le principe de la vaccination.

6 Un vaccin contre le VIH : difficulté et perspectives

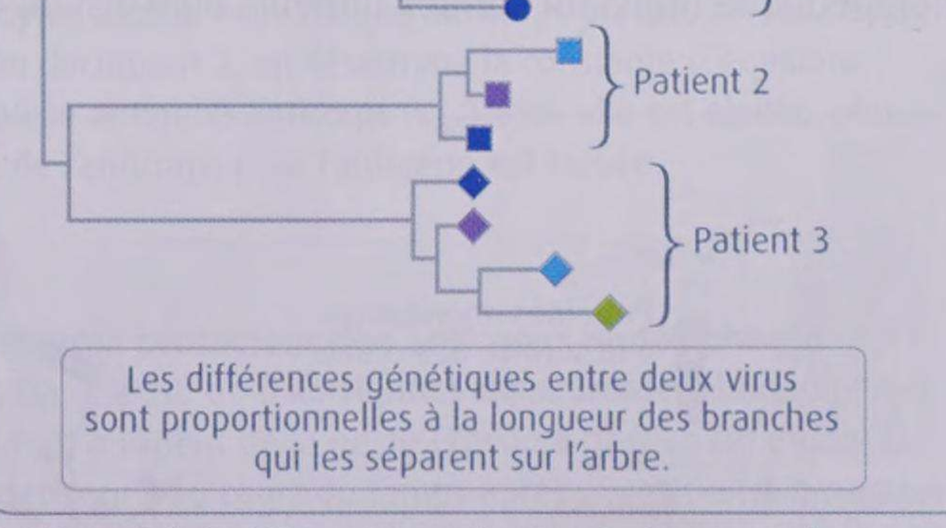
Raisonner

Le VIH présente un cycle de réplication très rapide (10^8 à 10^9 virions peuvent être produits chaque jour) et un taux de mutation et de recombinaison élevé. Chez plusieurs patients infectés par le VIH, on prélève à différents moments après le dépistage, des échantillons de sang à partir desquels on isole les ARN viraux. On détermine la séquence de ces ARN. Les séquences obtenues sont comparées de manière à construire un arbre phylogénétique (doc. 1). Dans une autre étude, des anticorps (nommés 2G12 et PG16) ont été isolés à partir de cultures de lymphocytes B mémoires activés, prélevés chez des patients porteurs du VIH. Leur activité de neutralisation de différentes souches de virus HIV est présentée (doc. 2).

Souches virales	IC_{50} moyen (µg/ml)	
	2G12	PG16
A	17,10	0,11
B	0,82	0,7
C	2,93	0,25
D	7,71	0,02
E	>50	0,03
F	0,95	0,03
G	31,03	1,21
H	9,23	0,08

IC_{50} : quantité d'anticorps nécessaire pour neutraliser 50 % de l'activité infectieuse du VIH.

2. Activité de neutralisation des anticorps 2G12 et PG16 contre différentes souches de VIH.



1. Diversité du VIH entre patients et chez un même patient. Au cours de l'infection, chaque patient présente des variants viraux qui lui sont propres et, chez un même patient, plusieurs variants coexistent.

❶ Qualifiez l'évolution du VIH au cours de l'infection et expliquez en quoi cet aspect peut rendre difficile la mise au point d'un vaccin.

❷ Expliquez pourquoi les laboratoires cherchant à mettre au point un vaccin contre le VIH s'intéressent particulièrement à caractériser les sites antigéniques reconnus par les anticorps tels que PG16.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 La réaction inflammatoire aiguë

La réaction inflammatoire aiguë est un mécanisme essentiel de l'immunité innée, première ligne de défense de l'organisme contre les agressions.

QCM

Pour chaque question, sélectionnez la bonne réponse.

1. Les symptômes de la réaction inflammatoire aigüe :

a. sont variables.
b. apparaissent tardivement (7 jours après l'infection).
c. sont induits par des molécules solubles.
d. s'interrompent dès que la réaction adaptative a démarré.

2. La réaction inflammatoire aiguë est déclenchée :

a. sans qu'il y ait nécessité de reconnaissance de l'agent infectieux.
b. suite à l'activation des récepteurs de la douleur présents dans les tissus.
c. suite à l'activation de cellules présentes en permanence dans les tissus (cellules sentinelles).
d. si la réponse immunitaire adaptative n'a pas permis la destruction du pathogène.

3. La réaction inflammatoire met en jeu :

a. uniquement des cellules sentinelles présentes sur le site d'infection.
b. des médiateurs chimiques synthétisés par les agents infectieux.
c. uniquement des cellules recrutées sur le site d'infection, en provenance du plasma.
d. à la fois des cellules sentinelles et des cellules sanguines recrutées sur le site d'infection.

4. Au terme de la réaction inflammatoire, les cellules sentinelles :

a. sont toujours éliminées.
b. peuvent participer à l'initiation de la réponse adaptative.
c. regagnent les tissus infectés.
d. ont toujours totalement détruit les agents infectieux.

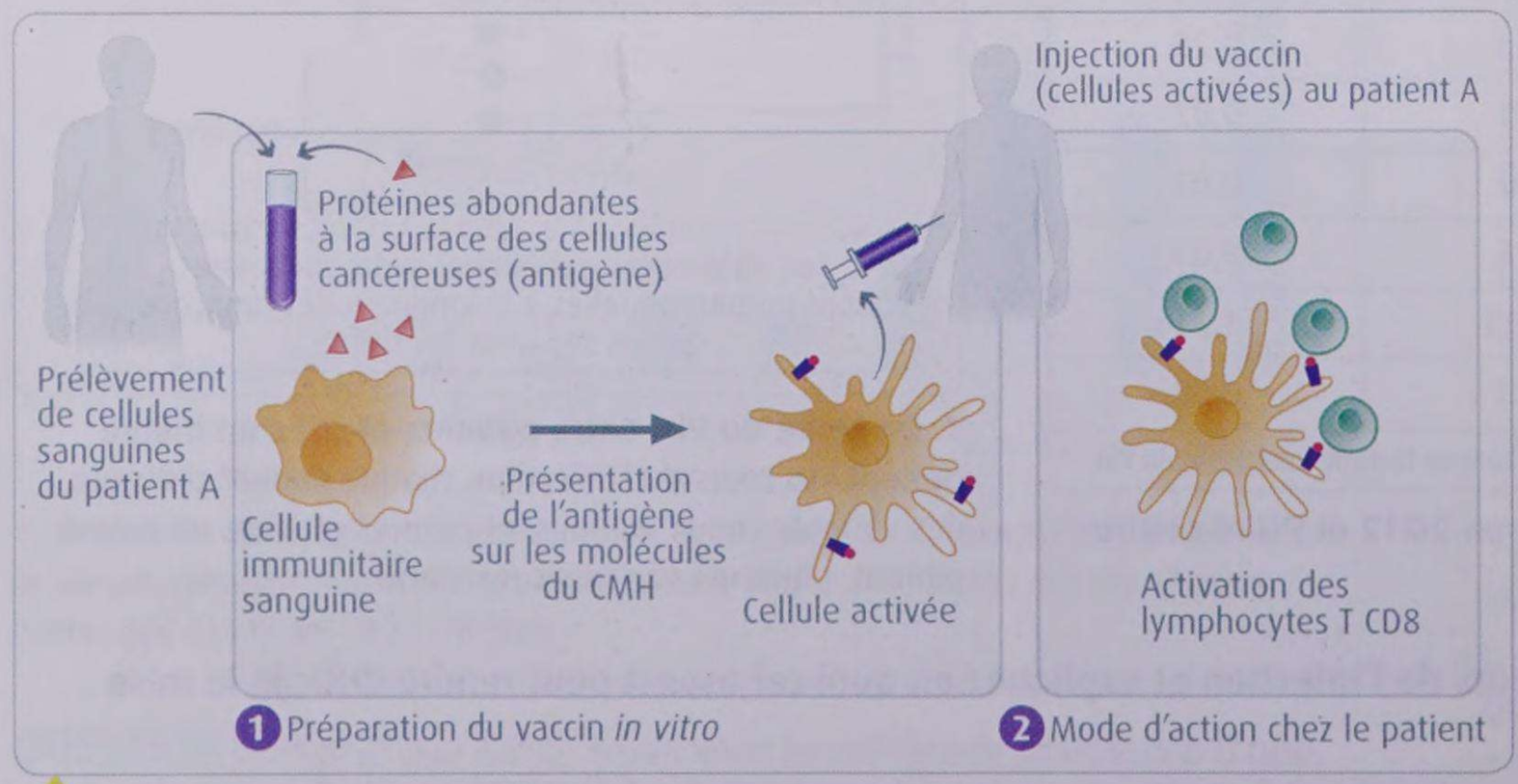
QUESTION À partir d'exemples de votre choix, expliquez quelles sont les conditions de production des médiateurs chimiques de l'inflammation et leurs fonctions.

exploiter des résultats expérimentaux

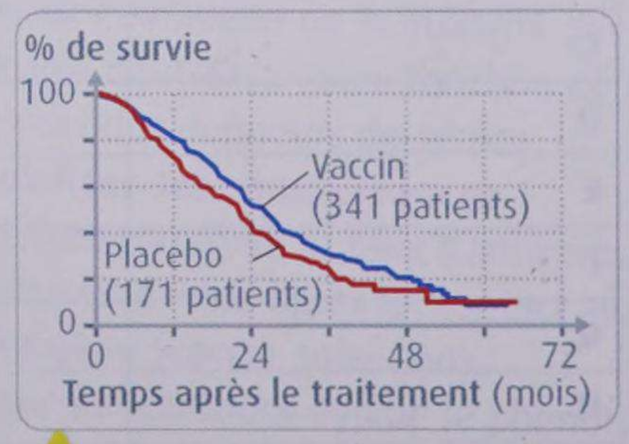
3 points

2 Un vaccin thérapeutique contre le cancer

De nombreuses équipes de recherche tentent de mettre au point des vaccins anti-cancer. En 2010, l'administration américaine a autorisé la mise sur le marché d'un vaccin thérapeutique (agissant sur des tumeurs déjà installées) contre le cancer avancé de la prostate (doc. 1). Elle a fondé sa décision sur les résultats d'une étude clinique pratiquée sur 512 patients lors de laquelle l'effet du traitement a été comparé à celui d'un traitement de type placebo (doc. 2).



1 Principe d'un vaccin thérapeutique contre le cancer de la prostate.



2 Efficacité du traitement

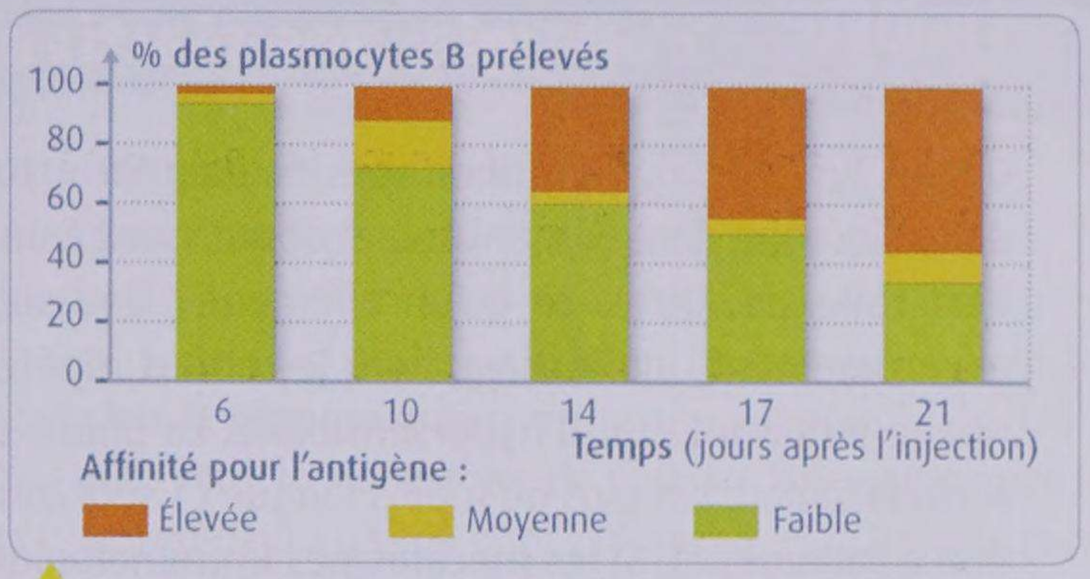
QUESTION Après avoir explicité le principe de ce vaccin et l'avoir comparé à celui d'un vaccin classique, indiquez pourquoi les résultats obtenus doivent inciter à un optimisme prudent.

résoudre un problème scientifique

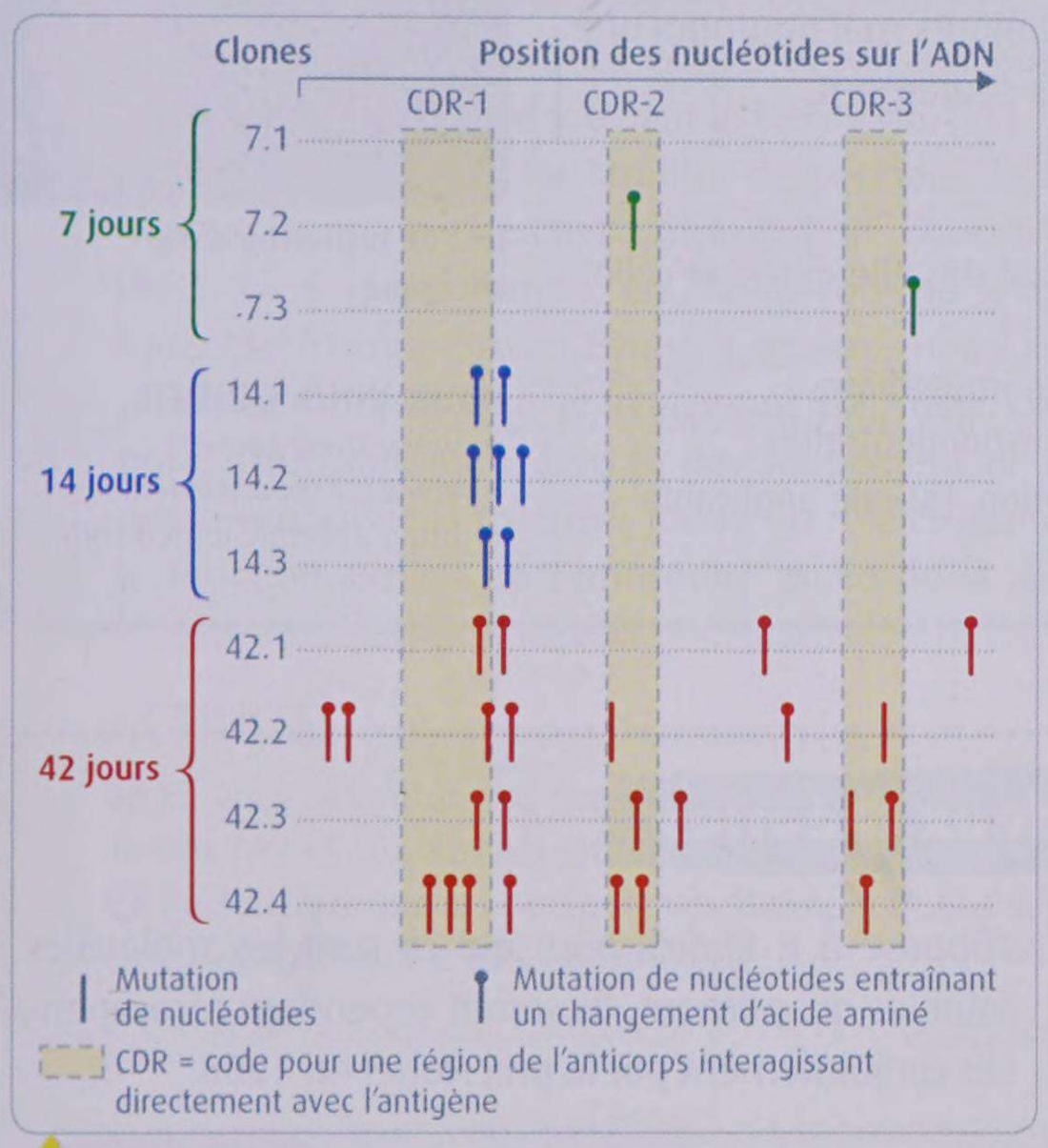
5 points

3 Le phénomène de maturation d'affinité

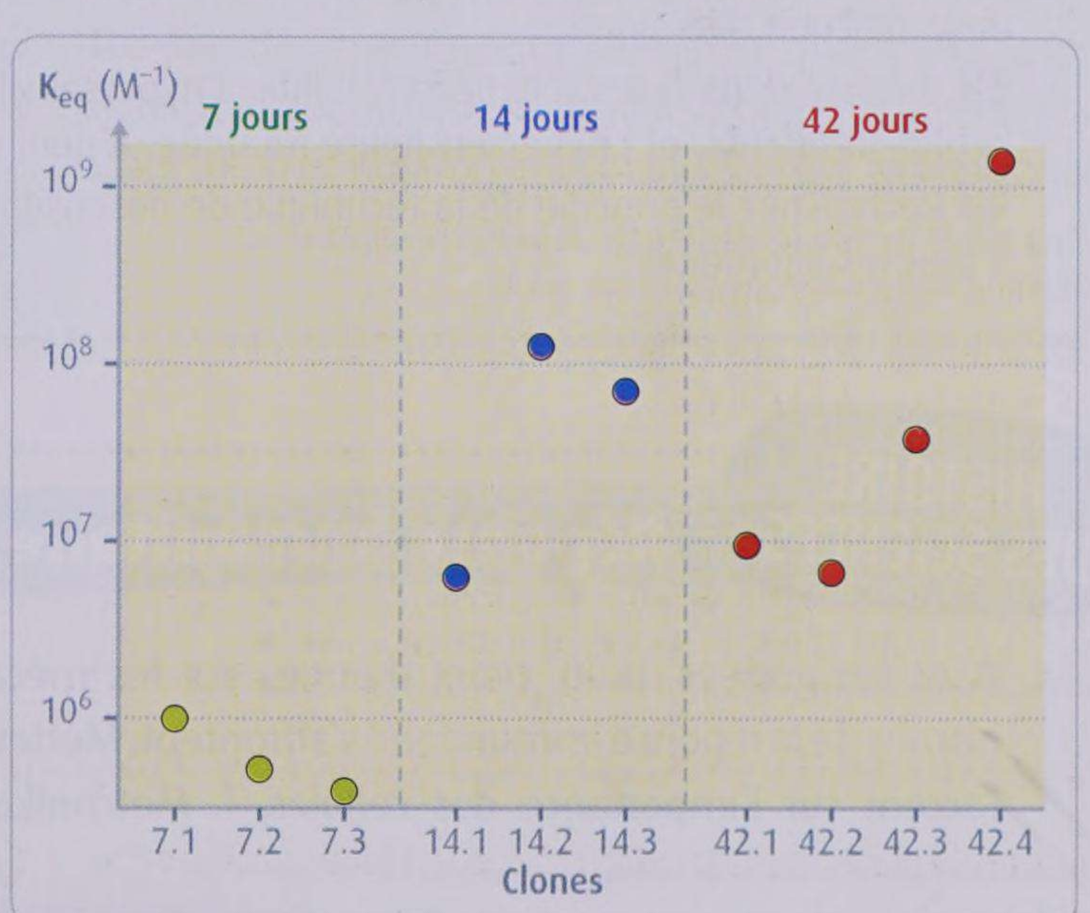
Au cours de la réaction immunitaire adaptative, les lymphocytes B spécifiques d'un antigène donné sont sélectionnés : ils se multiplient et se différencient en plasmocytes sécréteurs d'anticorps. La capacité d'un anticorps donné à neutraliser un pathogène dépend en partie de la force avec laquelle il est capable de lier son antigène spécifique. Cette force de liaison est qualifiée d'affinité de l'anticorps pour l'antigène. Les expériences suivantes, réalisées chez la souris, visent à étudier la variation de l'affinité des anticorps au cours de la réaction immunitaire.



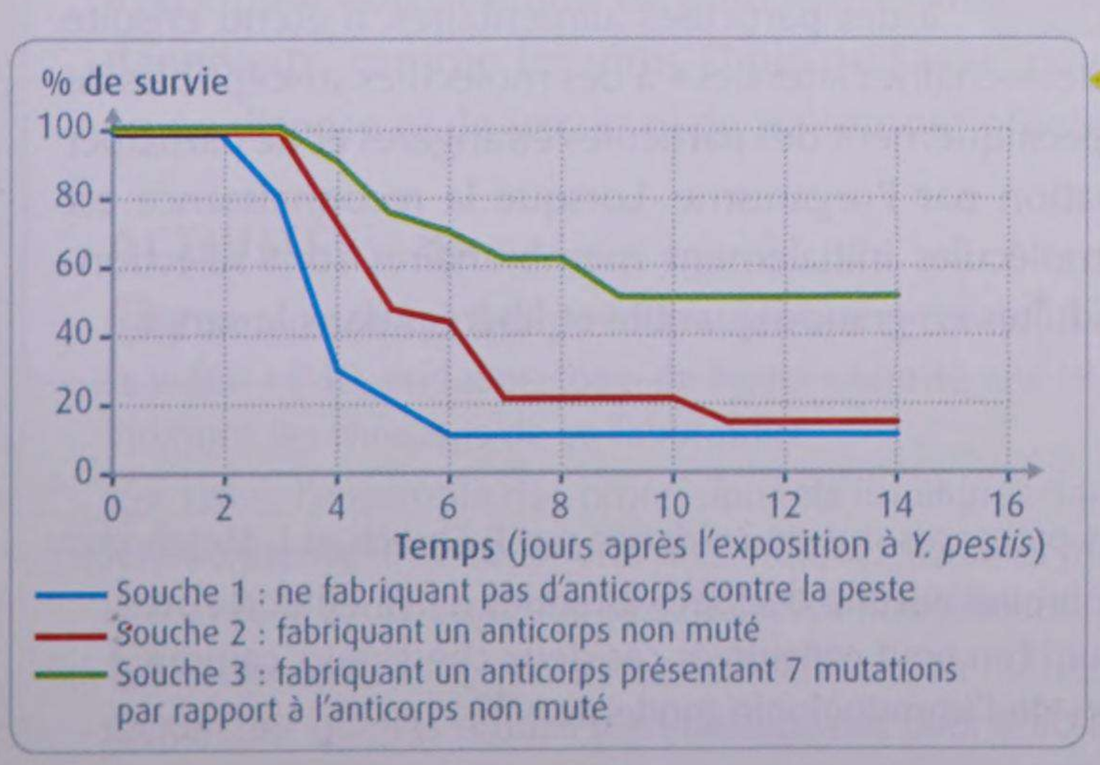
1 Évolution de l'affinité des anticorps produits par une population de plasmocytes. On injecte à des souris une molécule antigénique. Les jours suivant cette injection, les plasmocytes spécifiques de la molécule sont prélevés. L'étude de l'affinité des anticorps produits permet de distinguer trois catégories de plasmocytes dont on peut déterminer les proportions.



2 Caractérisation génétique de clones de plasmocytes isolés. À différents temps suivant l'injection de l'antigène, on isole des clones de plasmocytes. Pour chacun, on détermine la séquence du gène codant la partie variable de la chaîne légère des anticorps. Elle est comparée à la séquence de ce même gène dans les lymphocytes naïfs : toute différence traduit la présence d'une mutation.



3 Affinité des anticorps produits par les clones de plasmocytes isolés. Pour chaque anticorps produit par les clones décrits au document 2, on détermine la constante d'équilibre du complexe antigène-anticorps (K_{eq}). Plus elle est élevée, plus l'affinité de l'anticorps pour l'antigène est élevée.



4 Étude du rôle protecteur des anticorps mutés chez la souris. On dispose de trois souches de souris de laboratoire que l'on soumet à l'agent de la peste (*Yersinia pestis*). On étudie la survie des souris au cours du temps après exposition à *Y. pestis*. On précise que l'anticorps muté présente une affinité pour l'antigène 35 fois plus importante que l'anticorps non muté.

QUESTION L'évolution de l'affinité des anticorps produits par les plasmocytes au cours du temps est qualifiée de « maturation d'affinité ». En utilisant les documents fournis, décrivez le phénomène de maturation d'affinité et proposez-en une explication moléculaire. Discutez de son importance quant à l'efficacité de la réponse immunitaire.

ATELIERS D'EXPLORATION

ENQUÊTE — L'allergie, une réaction inflammatoire

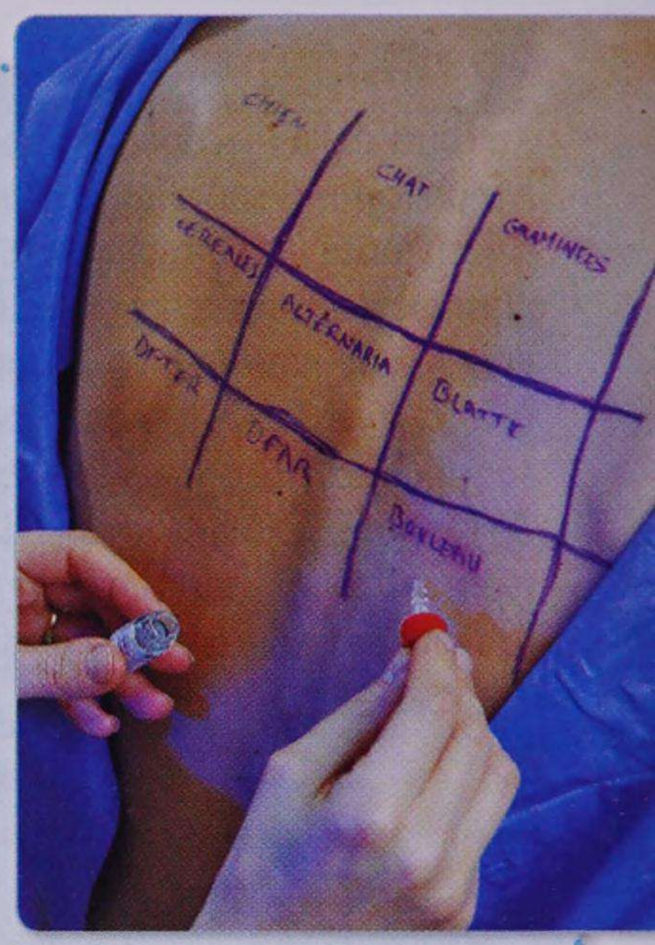
Quand les réactions immunitaires échappent à tout contrôle lors de l'entrée d'un allergène dans l'organisme et aboutissent à une pathologie inflammatoire, c'est l'allergie. Qu'est-ce qu'un allergène ? Une substance commune de notre environnement, inoffensive, dont le contact répété avec notre système immunitaire induit un état d'hypersensibilité. La phase qui précède cet état, dite de sensibilisation, est plus ou moins longue (1 seul contact ou des années d'exposition à l'allergène). Si les mécanismes immunologiques conduisant à l'hypersensibilité sont de mieux en mieux connus, on comprend toujours mal pourquoi une réaction allergique se déclenche chez certains individus seulement.

ACTIVITÉS

❶ Montrez, à partir d'une recherche sur Internet, la diversité des allergènes et celle de la réaction allergique.

❷ Il existe deux types d'hypersensibilité : l'hypersensibilité immédiate, la plus fréquente, et l'hypersensibilité retardée. À quoi correspondent-elles ?

❸ Recherchez le principe de la technique de désensibilisation. Est-elle applicable à tous les allergènes ?



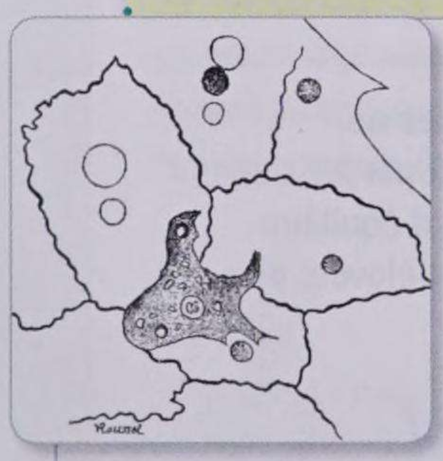
Test de recherche d'un allergène.

POUR VOUS GUIDER

- www.ameli-sante.fr
- www.passeportsante.net
- http://allergie.remede.org

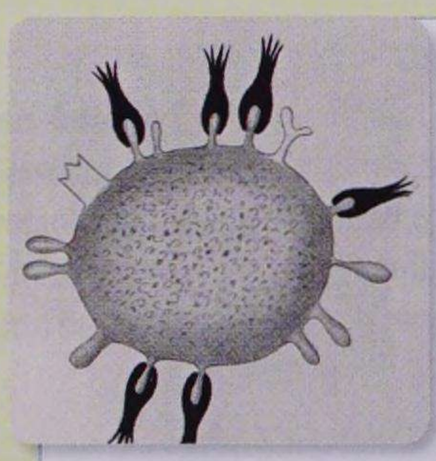
HISTOIRE DES SCIENCES — Réponse immunitaire : deux théories

Dans les années 1890, deux théories sur les mécanismes de la réponse immunitaire s'affrontent. Mettant l'accent sur l'importance des cellules, I. Metchnikov s'oppose à P. Ehrlich pour qui ce sont les molécules solubles qui priment. Ils seront cependant récompensés conjointement par le prix Nobel en 1908.



La théorie phagocytaire d'Ilya Metchnikov.

Ilya Metchnikov, immunologiste russe, s'interroge sur les modalités d'absorption des nutriments par les cellules. Travaillant sur de nombreuses espèces d'organismes unicellulaires, il met en évidence la capacité de ces cellules à se déformer pour ingérer puis digérer des particules. Par la suite, il montre que ce même mécanisme est conservé chez certaines cellules d'organismes pluricellulaires (crustacés, éponges, vertébrés...) qui peuvent ainsi ingérer et digérer des éléments d'origine étrangère et participer à la défense de l'organisme.



La théorie des chaînes latérales d'Ehrlich.

Également intéressé par la nutrition cellulaire, Paul Ehrlich, biologiste allemand, postule l'existence de « chaînes latérales », structures préformées présentes sur la membrane cellulaire et capables de se lier de façon spécifique à des particules alimentaires. Il étend ensuite cette théorie des « chaînes latérales » à des molécules susceptibles de reconnaître spécifiquement des particules étrangères et de participer à leur élimination par l'organisme. Lorsque la reconnaissance est efficace, ces molécules initialement membranaires sont sélectionnées puis produites en grande quantité et libérées dans le sang.

ACTIVITÉS

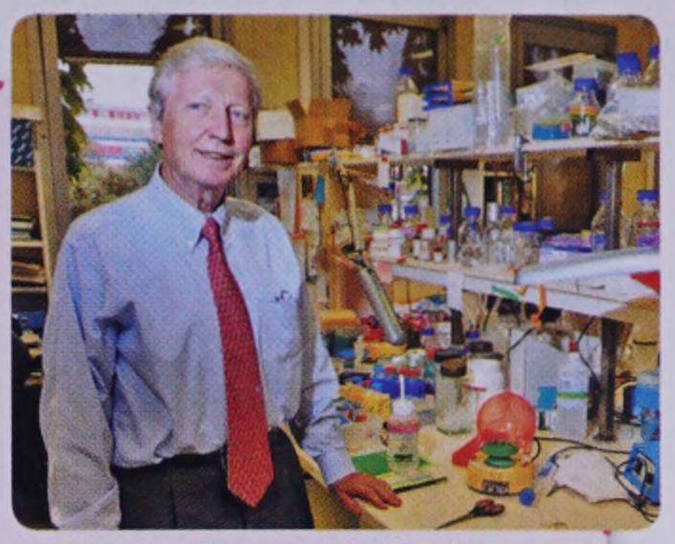
❶ Identifiez les processus mis en évidence par P. Ehrlich et I. Metchnikov.

❷ Expliquez pourquoi aucune des deux théories ne l'a emporté sur l'autre et pourquoi l'on peut considérer ces deux chercheurs comme les co-fondateurs de l'immunologie moderne.

SCIENCES ACTUALITÉ

Un Nobel pour l'immunologie

En 2011, l'Américain Bruce Beutler, le Français Jules Hoffmann et le Canadien Ralph Steinman reçoivent le prix Nobel de physiologie et médecine pour leurs travaux sur les relations entre immunité innée et immunité adaptative. Les travaux des deux premiers sont décrits dans le texte ci-dessous. Ralph Steinman a quant à lui découvert les cellules dendritiques, acteurs du système immunitaire capables d'activer et de réguler la réponse adaptative.



Jules Hoffmann, médaille d'or du CNRS et Prix Nobel en 2011.

De la mouche à l'Homme.

« Le chercheur [Jules Hoffmann, dans les années 80] et son équipe s'attellent à un gigantesque chantier : l'identification de tous les peptides antimicrobiens produits par la drosophile pour se défendre. "Pour isoler chacune de ces substances, on a dû piquer et infecter près de 100 000 mouches !" se souvient le biologiste. [...]

Après avoir identifié les familles de peptides, la suite logique était de chercher comment ils étaient produits. La surprise tombe, en 1996, comme le narre Jules Hoffmann : "Avec Bruno Lemaître, nous avons réussi à montrer que le récepteur Toll, déjà connu pour son implication dans le développement de l'axe dorso-ventral de la mouche, jouait un rôle crucial dans le fonctionnement de l'immunité innée de la drosophile : il contribue à identifier l'agresseur et à déclencher la réponse antimicrobienne adaptée." [...] Un an plus tard, le laboratoire de Charles Janeway trouve des homologues de Toll chez l'Homme – les Toll-like receptors, et l'année suivante Bruce Beutler décrit le fonctionnement de l'un de ces récepteurs dans la défense anti-microbienne. [...]

Point essentiel : ces recherches ont clairement établi que, en plus de contrôler une réponse de défense anti-microbienne directe, comme chez la drosophile, les récepteurs Toll-like des mammifères sont rien que moins que le système d'alarme qui déclenche le système immunitaire adaptatif, avec notamment l'activation des lymphocytes. »

Laure Cailloce, extrait de « Jules Hoffmann, un Nobel en or », *Le journal du CNRS*, n° 263, décembre 2011.

ACTIVITÉS

❶ En vous aidant de vos connaissances, argumentez l'attribution du Prix Nobel aux travaux cités.

❷ Recherchez quelles perspectives thérapeutiques sont envisageables grâce à ces découvertes.

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.science.gouv.fr (tapez « Nobel 2011 »)
- www.inserm.fr (tapez « Récepteurs TLR »)
- www.rcsb.org/pdb/101/motm.do?momID=143

MÉTIER

Différents métiers dans un laboratoire

Le fonctionnement d'un laboratoire de biologie repose sur la collaboration entre différents métiers. Prenons l'exemple des laboratoires qualifiés de P4 (pour pathogène de classe 4), ayant pour objet l'étude de pathogènes très contagieux et dangereux, comme les virus Ebola ou Lassa, pour lesquels on ne dispose ni de vaccin ni de traitement efficace.

Protections dans un laboratoire P4.

ACTIVITÉS

❶ Connectez-vous à la première adresse ci-contre, regardez la vidéo « P4D, un laboratoire de haute sécurité aux HUG » et indiquez les missions de ce laboratoire.

❷ Listez l'ensemble des professionnels impliqués dans le fonctionnement de ce laboratoire. Indiquez d'autres métiers en lien avec la problématique des maladies infectieuses.

❸ Parmi cette liste, choisissez et définissez un métier, puis recherchez quelles études sont nécessaires pour y accéder.

POUR VOUS GUIDER onisep

- http://virologie.hug-ge.ch/centres_reference/crive_P4D.html
- www.onisep.fr
- www.metiersdelasante.com
- www.sante.gouv.fr (tapez « Métiers »)
- www.libthèque.fr/svtlycée

THÈME 6

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

MOBILISER SES ACQUIS p. 324

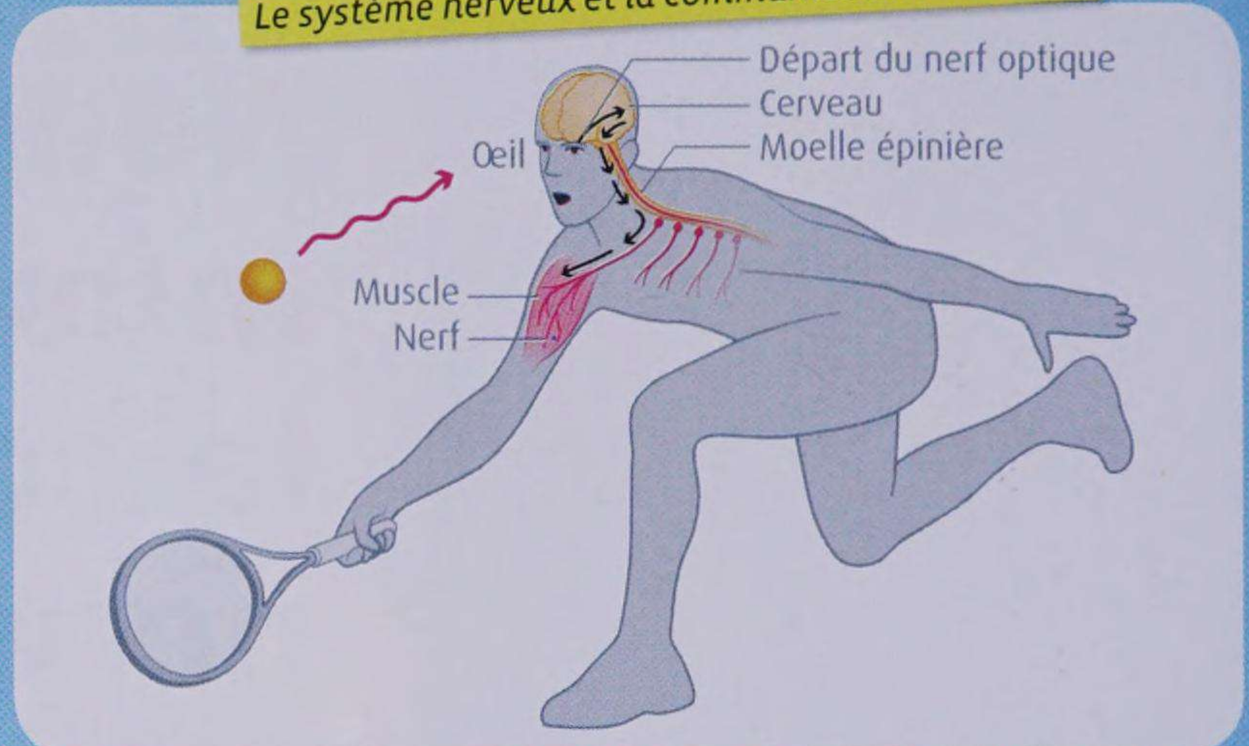
1. Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle p. 327
2. Motricité, volonté et plasticité cérébrale p. 345

Surf en longboard, plage de Pupukea, île d'Hawaii (Etats-Unis).

1. Quels sont les acteurs de la commande du mouvement ?

Novak Djokovic lors d'un match de tennis

Le système nerveux et la communication nerveuse



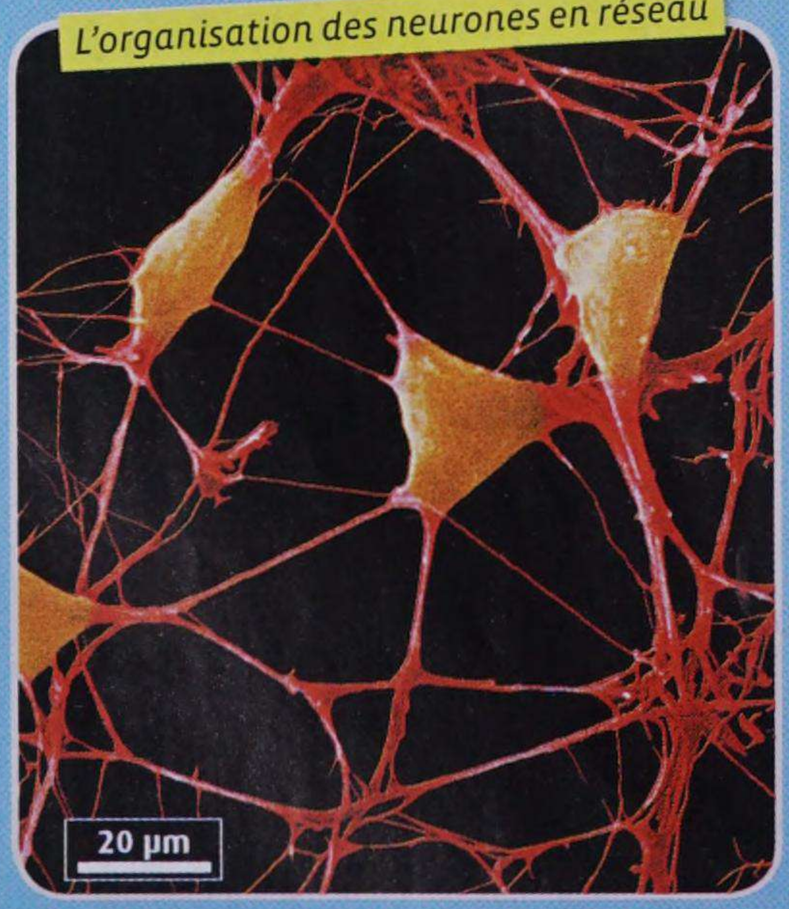
1. **À partir de la photographie, retrouvez les différents organes impliqués dans la commande du mouvement. Positionnez sur le schéma les légendes suivantes : stimulus, organe sensoriel (récepteur), centres nerveux, effecteur.**
3. **Précisez en quelques mots le rôle des centres nerveux.**

mots clés

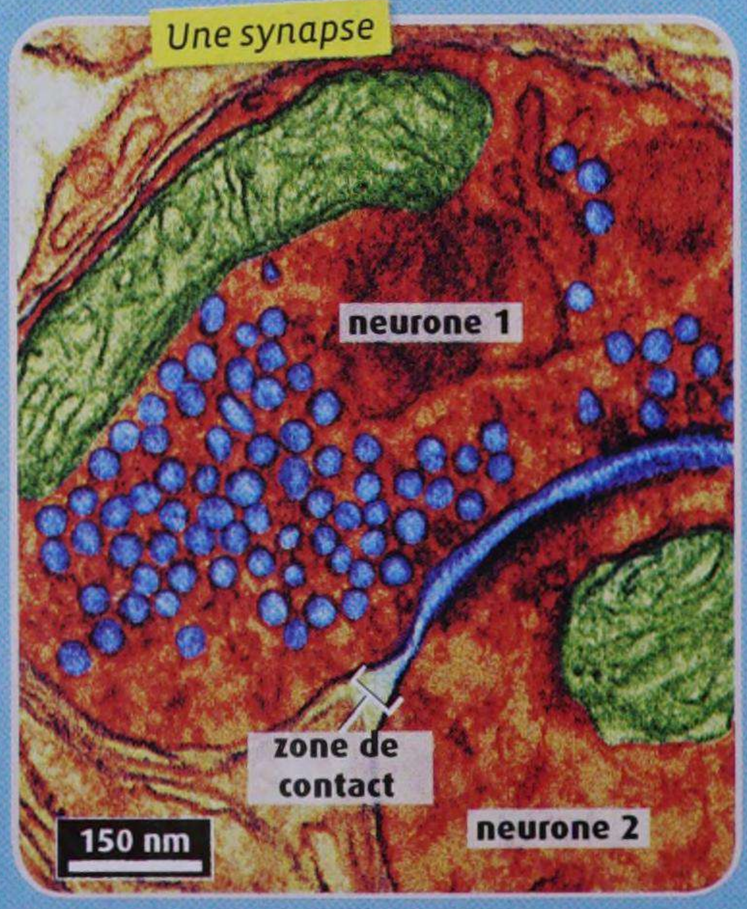
Centre nerveux : organe du système nerveux où parviennent les voies nerveuses sensorielles et d'où sont issues les voies nerveuses effectrices.
Organe sensoriel : organe produisant un message nerveux en réponse à une stimulation environnementale.

2. Comment les messages nerveux sont-ils transmis ?

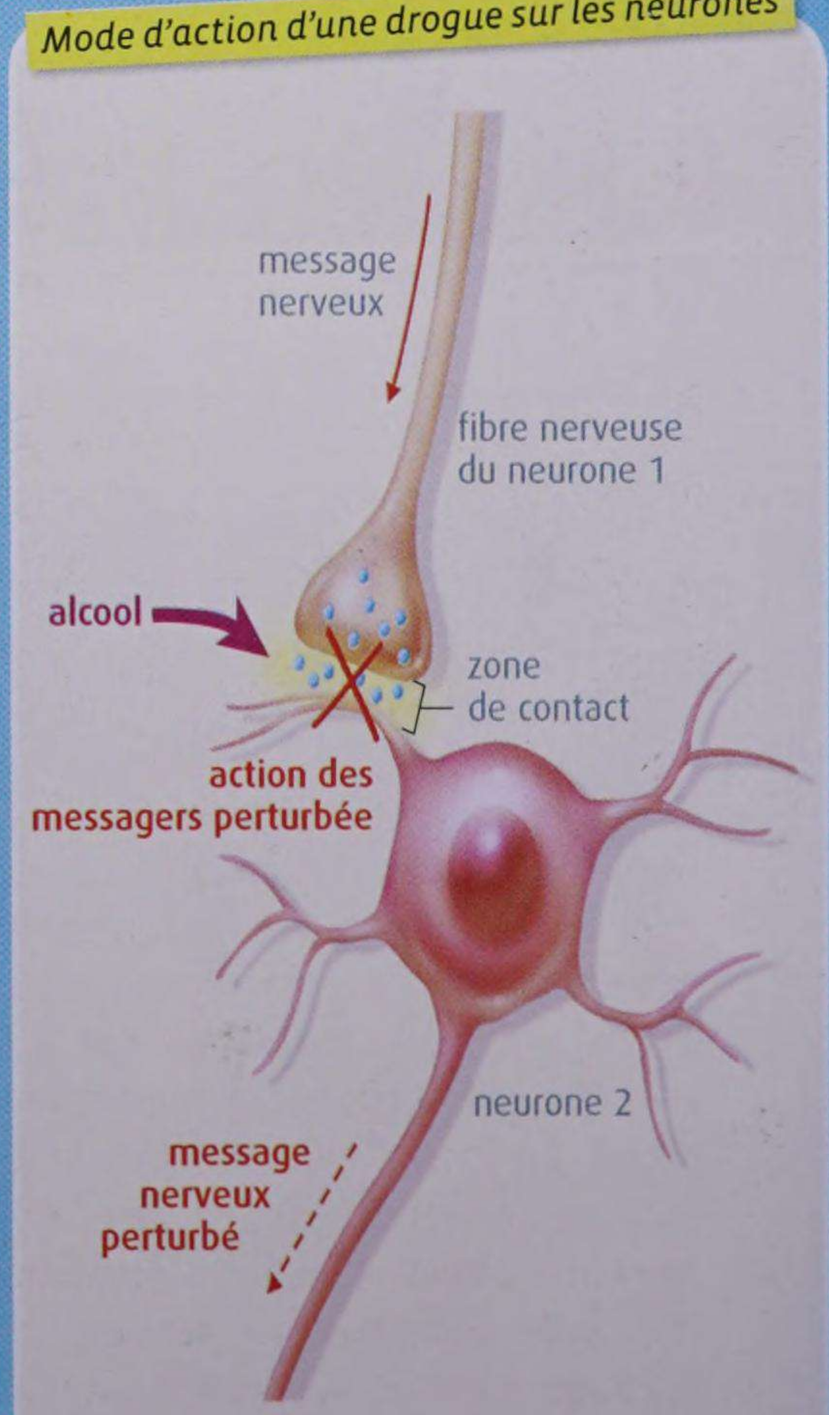
L'organisation des neurones en réseau



Une synapse



Mode d'action d'une drogue sur les neurones

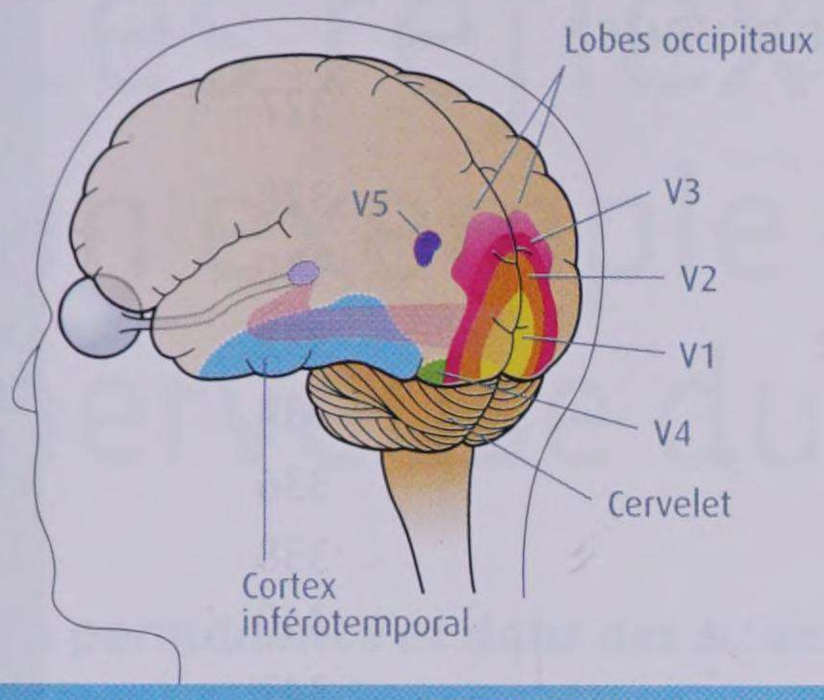


1. **Comment les neurones communiquent-ils entre eux ?**
2. **Quels sont les caractéristiques de la transmission nerveuse ?**
3. **Quel est le mode d'action d'une drogue ?**

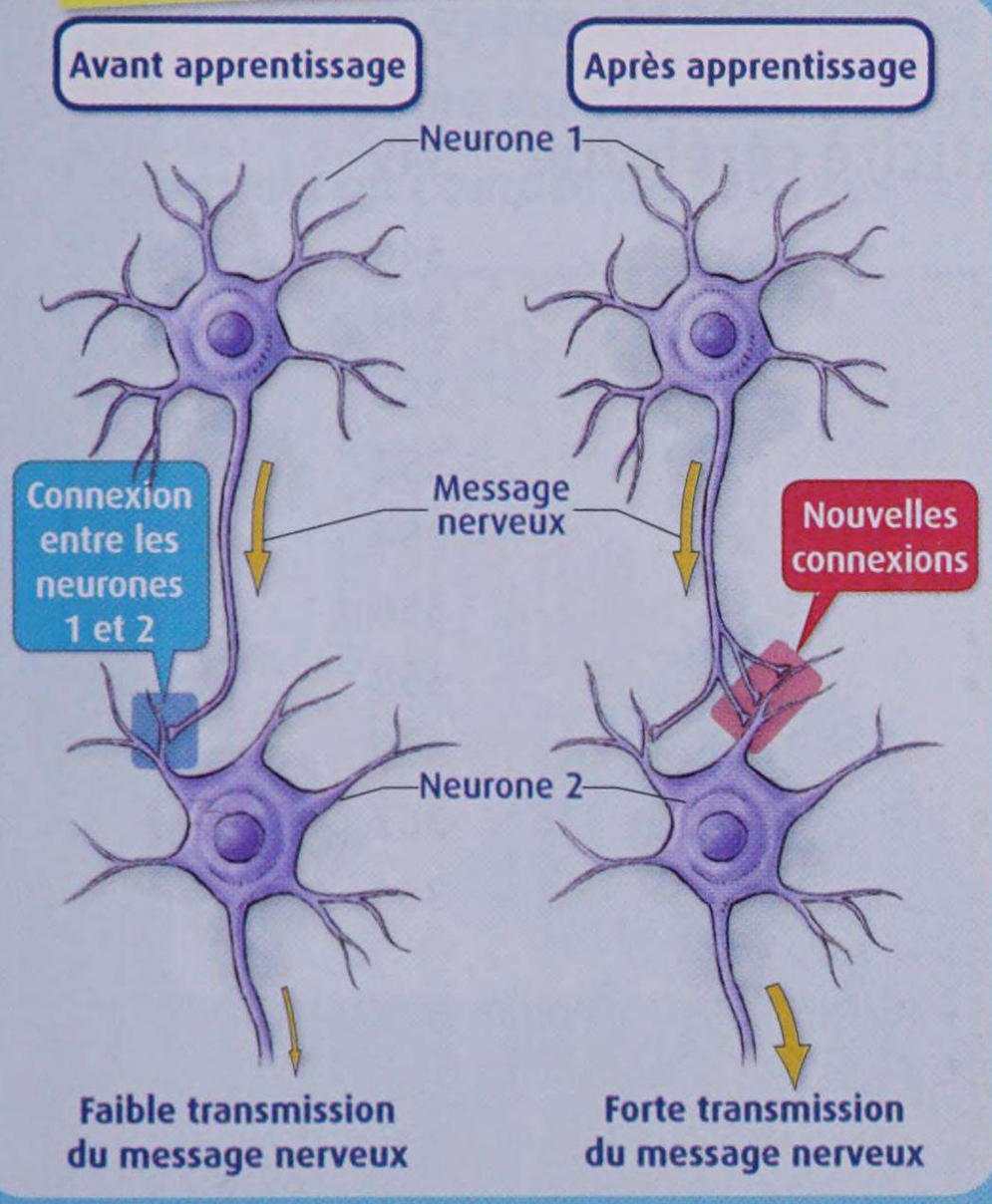
Drogue : molécule modifiant le fonctionnement cérébral et pouvant entraîner une dépendance
Neurotransmetteur : molécule assurant la transmission du message nerveux entre deux neurones.

3. Comment le cortex évolue-t-il au cours de la vie ?

Les aires fonctionnelles du cortex visuel



La plasticité des connexions neuronales



Plasticité induite par l'apprentissage de la lecture de mots et phrases inversés

1. **Comment le cortex visuel est-il organisé ?**
2. **En quoi consiste la plasticité du cortex visuel ?**

Cortex visuel : région du cortex constituée du cortex visuel primaire (V1) et des autres aires visuelles.
Plasticité cérébrale : capacité d'adaptation anatomique et fonctionnelle du cerveau en fonction des expériences vécues par l'individu.

CE QU'IL FAUT SAVOIR POUR ABORDER LE THÈME 6

La commande du mouvement est assurée par le **système nerveux** qui met en relation les organes sensoriels et les muscles. Le mouvement peut répondre à une stimulation extérieure reçue par un **organe sensoriel**, qui envoie un **message nerveux sensitif** aux centres nerveux via les nerfs sensitifs. Le cerveau élabore un **message nerveux moteur** transmis aux muscles par les nerfs moteurs.

Perception de l'environnement et commande du mouvement mettent en jeu des communications au sein d'un réseau de **neurones** qui permettent la transmission des messages nerveux. Ces communications peuvent être perturbées par des drogues, qui interfèrent avec l'action des **neurotransmetteurs**.

Comme toute région du **cortex**, le cortex visuel est organisé en plusieurs régions appelées aires corticales visuelles, ayant chacune une fonction spécifique (perception de la couleur, des formes, du mouvement, etc.). La perception visuelle repose sur la collaboration fonctionnelle de ces aires. L'expérience visuelle individuelle peut induire des réarrangements structuraux et fonctionnels au sein du réseau neuronal constituant le cortex visuel : c'est le phénomène de **plasticité cérébrale**.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle 327

UNITÉ 1 Les caractéristiques d'un réflexe myotatique 328
UNITÉ 2 Les voies nerveuses d'un réflexe myotatique 330
UNITÉ 3 Les neurones impliqués dans un réflexe myotatique 332
UNITÉ 4 Nature et transmission du message nerveux 334
UNITÉ 5 Le fonctionnement de la synapse neuromusculaire 336
Bilan des unités 338
L'essentiel 340
Exercices 342

CHAPITRE 2 Motricité, volonté et plasticité cérébrale 345

UNITÉ 1 La commande volontaire du mouvement 346
UNITÉ 2 Les voies motrices : du cortex aux muscles 348
UNITÉ 3 Plasticité cérébrale et apprentissage moteur 350
UNITÉ 4 Plasticité cérébrale et médecine 352
Bilan des unités 354
L'essentiel 356
Exercices 358
OBJECTIF BAC Épreuve écrite 360
OBJECTIF BAC Évaluation des compétences expérimentales 362
ATELIERS D'EXPLORATION SCIENCES ACTUALITÉ – ENQUÊTE – INFORMATIQUE – MÉTIER 364

CHAPITRE 1

Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle

En permanence et dans des situations variées, de nombreux muscles de notre corps se contractent et s'étirent sans que nous en ayons conscience. Ces réactions automatiques de l'organisme sont les manifestations de réflexes, parmi lesquels on compte les réflexes myotatiques.

La mise en œuvre d'un réflexe myotatique grâce à un marteau à réflexe.

Comment les réflexes myotatiques commandent-ils la contraction de certains muscles ?

UNITÉ 1

Les caractéristiques d'un réflexe myotatique

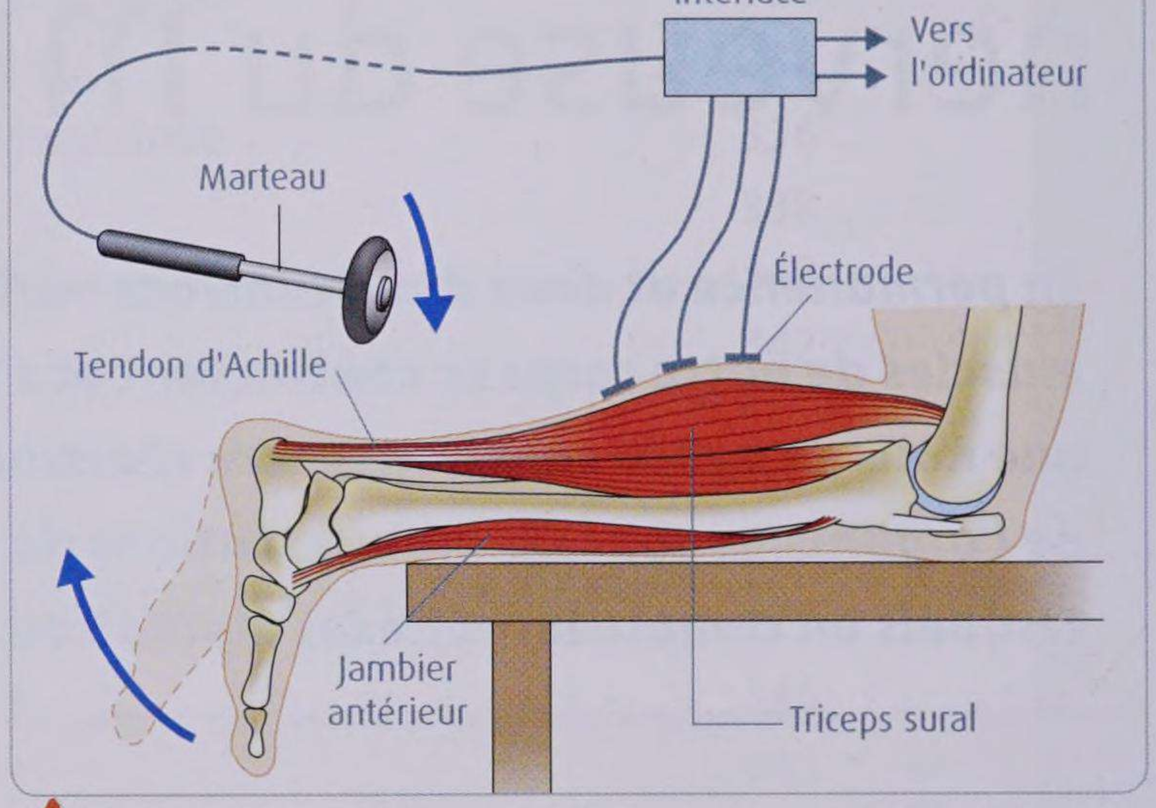
À chaque instant de la vie d'un individu, de nombreux réflexes sont mis en jeu. Parmi eux, on compte les réflexes myotatiques.

Quelles sont les caractéristiques des réflexes myotatiques ?

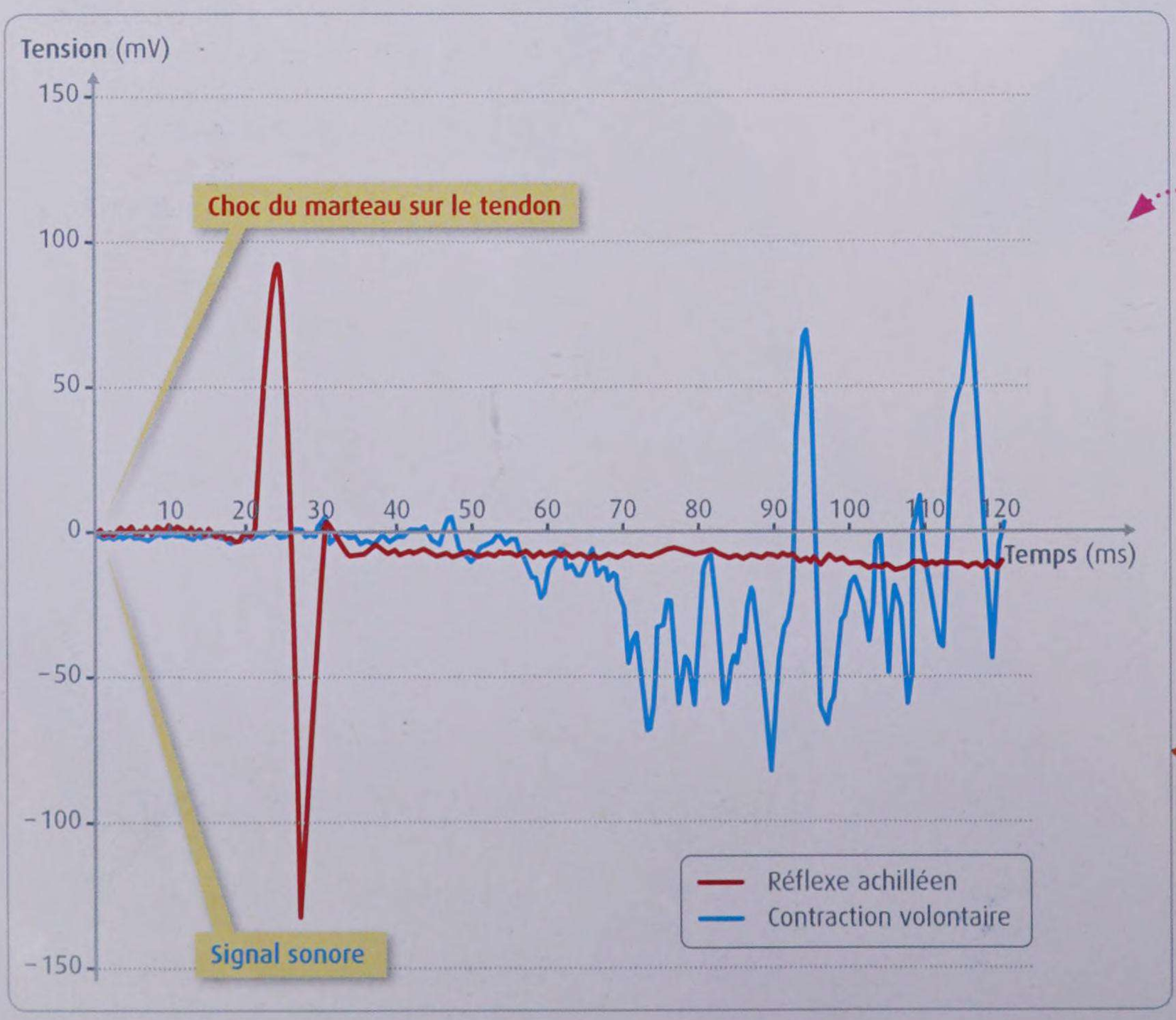
L'enregistrement d'un réflexe myotatique

Les réflexes sont impliqués, entre autres, dans le maintien de la posture : ils font que le corps reste en équilibre lorsque nous marchons, courons ou portons des charges. Les réflexes myotatiques sont des contractions involontaires de muscles provoquées par leur étirement. Ainsi, un choc sur le tendon d'Achille, qui induit l'étirement du muscle triceps sural, entraîne la contraction réflexe de ce même muscle et l'extension du pied : c'est le réflexe myotatique achilléen (voir doc. 2). Les réflexes myotatiques permettent aux médecins de vérifier le bon fonctionnement du système neuromusculaire responsable de la contraction du muscle. En effet, dans certaines situations pathologiques ces réflexes sont abolis. C'est par exemple le cas chez certaines personnes ayant subi une lésion accidentelle de la moelle épinière.

1 Que sont les réflexes myotatiques ?



2 Le dispositif expérimental d'étude d'un réflexe myotatique : le réflexe achilléen. La contraction d'un muscle s'accompagne de légers courants électriques enregistrables à la surface de la peau grâce à des électrodes. L'enregistrement obtenu est un électromyogramme.



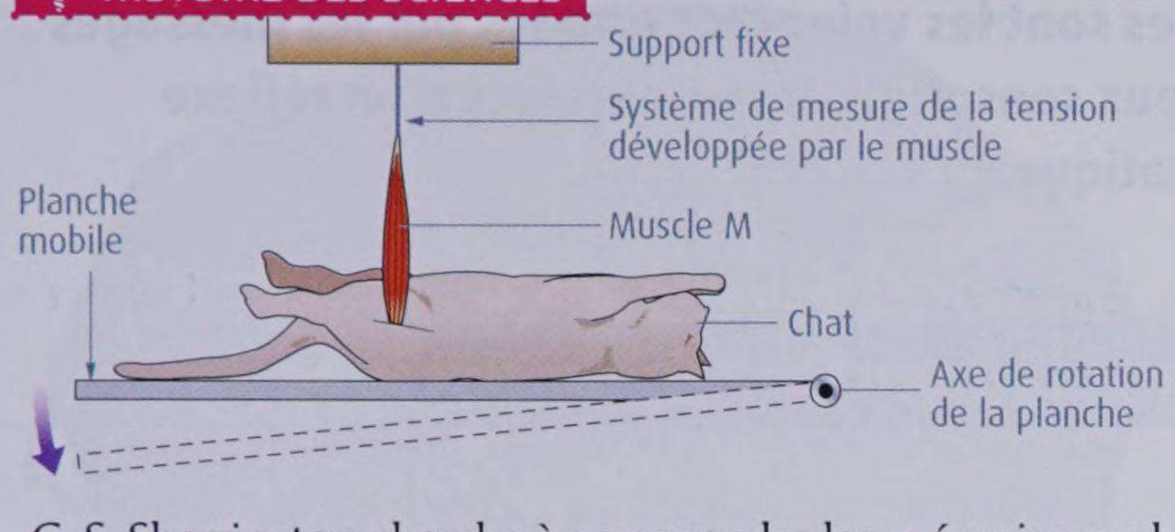
JE MANIPULE

- *Réalisez l'enregistrement du réflexe achilléen.*
- *Répétez l'expérience sur le même individu en lui demandant de contracter volontairement son muscle au moment il entend un signal sonore.*
- *Comparez dans les deux cas le délai entre la stimulation et la contraction du muscle.*

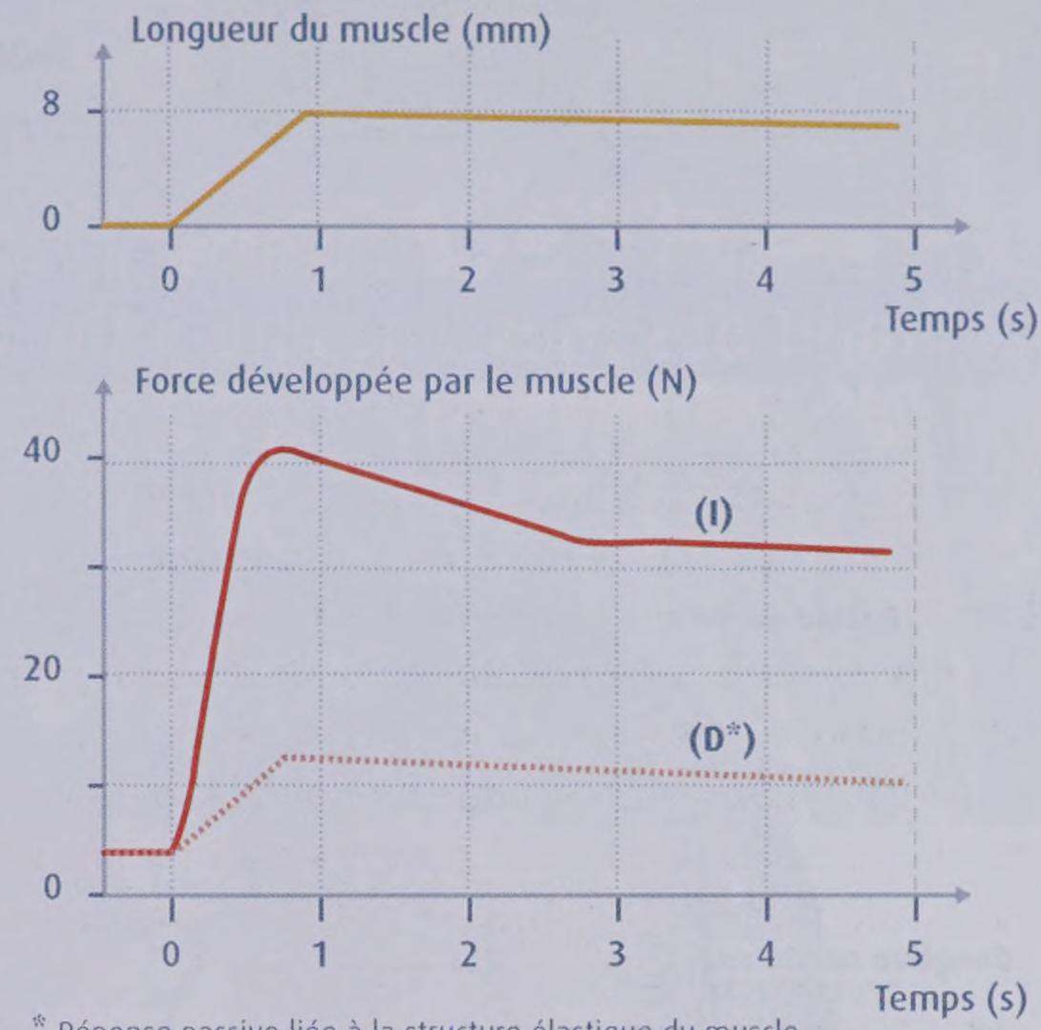
3 Électromyogrammes obtenus lors d'un réflexe achilléen (réflexe myotatique) et lors d'une contraction volontaire du muscle triceps sural. Le dispositif expérimental est schématisé doc. 2.

La caractérisation d'un réflexe myotatique

HISTOIRE DES SCIENCES

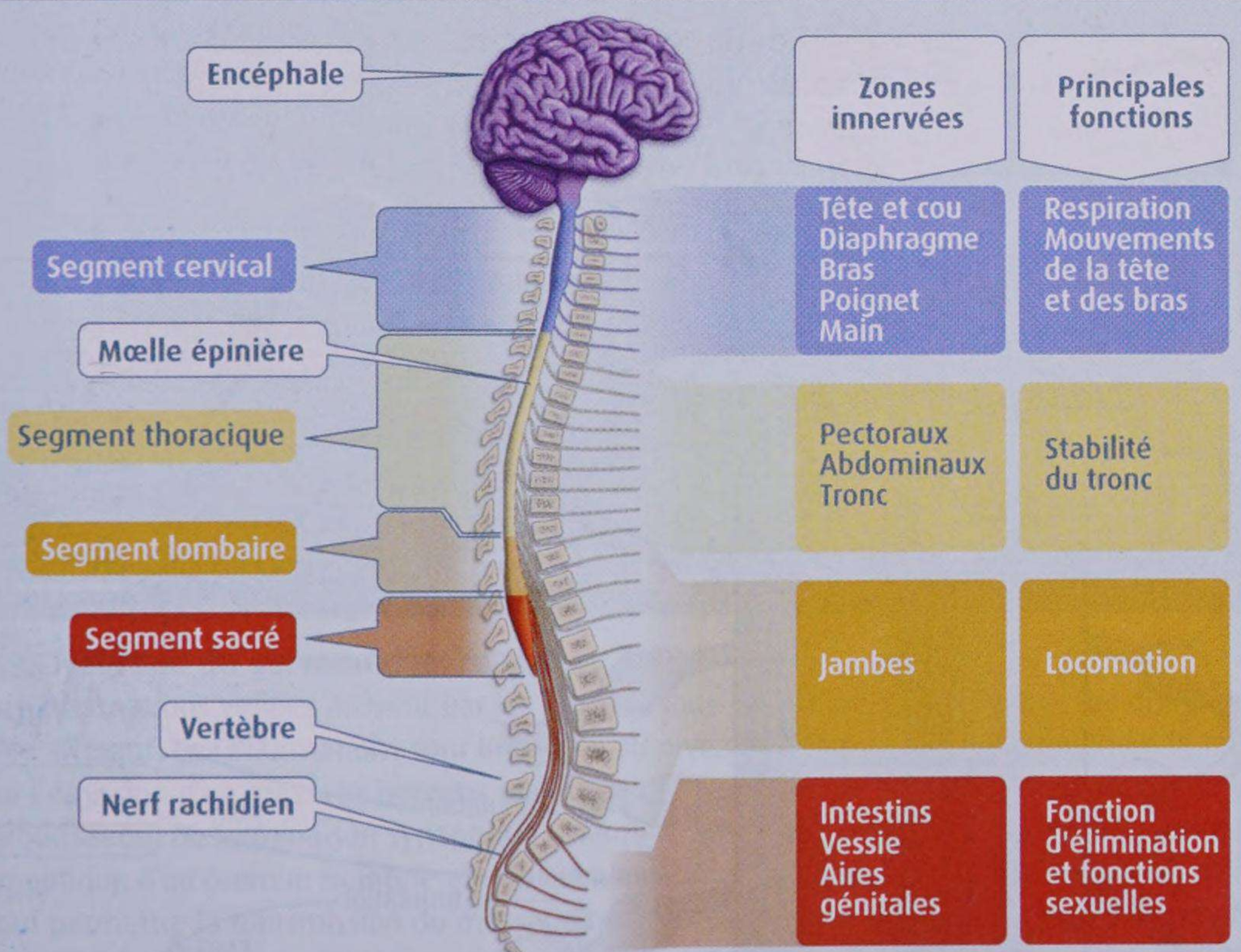


C. S. Sherrington cherche à comprendre les mécanismes de la rétraction réflexe de la patte chez le chat. Il anesthésie un animal, sectionne sa moelle épinière juste sous l'encéphale puis il l'allonge sur une planche pivotante. Il isole le muscle extenseur de la jambe (M) et le relie à un dispositif mesurant la longueur et la tension développée par le muscle. En faisant pivoter la planche, il obtient une extension du muscle comme lors du choc avec un marteau réflexe. Les mesures sont effectuées sur des chats dont le muscle est encore innervé (I) ou dont les nerfs ont été sectionnés (D).



* Réponse passive liée à la structure élastique du muscle

4 Les expériences de C. S. Sherrington (1924).



5 L'organisation du système nerveux chez l'Homme.
L'encéphale et la moelle épinière sont des centres nerveux.
Ils forment le système nerveux central. Les nerfs rachidiens (ou spinaux) mettent en relation le système nerveux central avec les organes et les muscles.
Ils véhiculent à la fois des messages nerveux sensoriels, en réponse à des stimuli variés détectés par des récepteurs sensoriels, et des messages nerveux moteurs.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 4.** Montrez qu'un réflexe myotatique est sous contrôle nerveux.
2 **DOC. 2 ET 3.** Montrez que le circuit nerveux n'est pas le même lors d'un mouvement réflexe et lors d'un mouvement volontaire.
3 **DOC. 4 ET 5.** Déterminez le centre nerveux responsable d'un réflexe myotatique et formulez une hypothèse quant aux voies empruntées par le message nerveux.
4 **EN CONCLUSION.** Réalisez un premier schéma fonctionnel d'un réflexe myotatique.

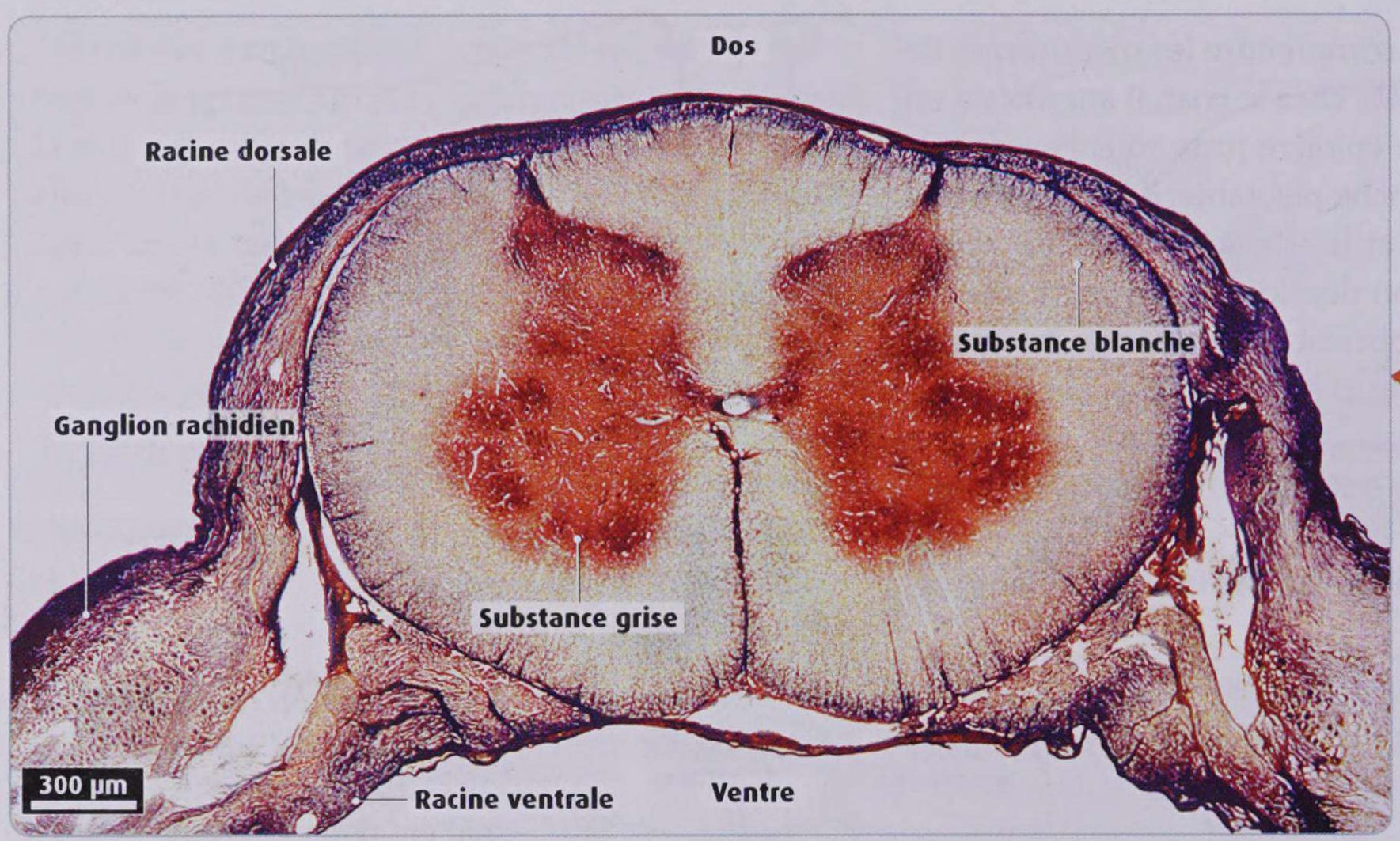
UNITÉ 2

Les voies nerveuses d'un réflexe myotatique

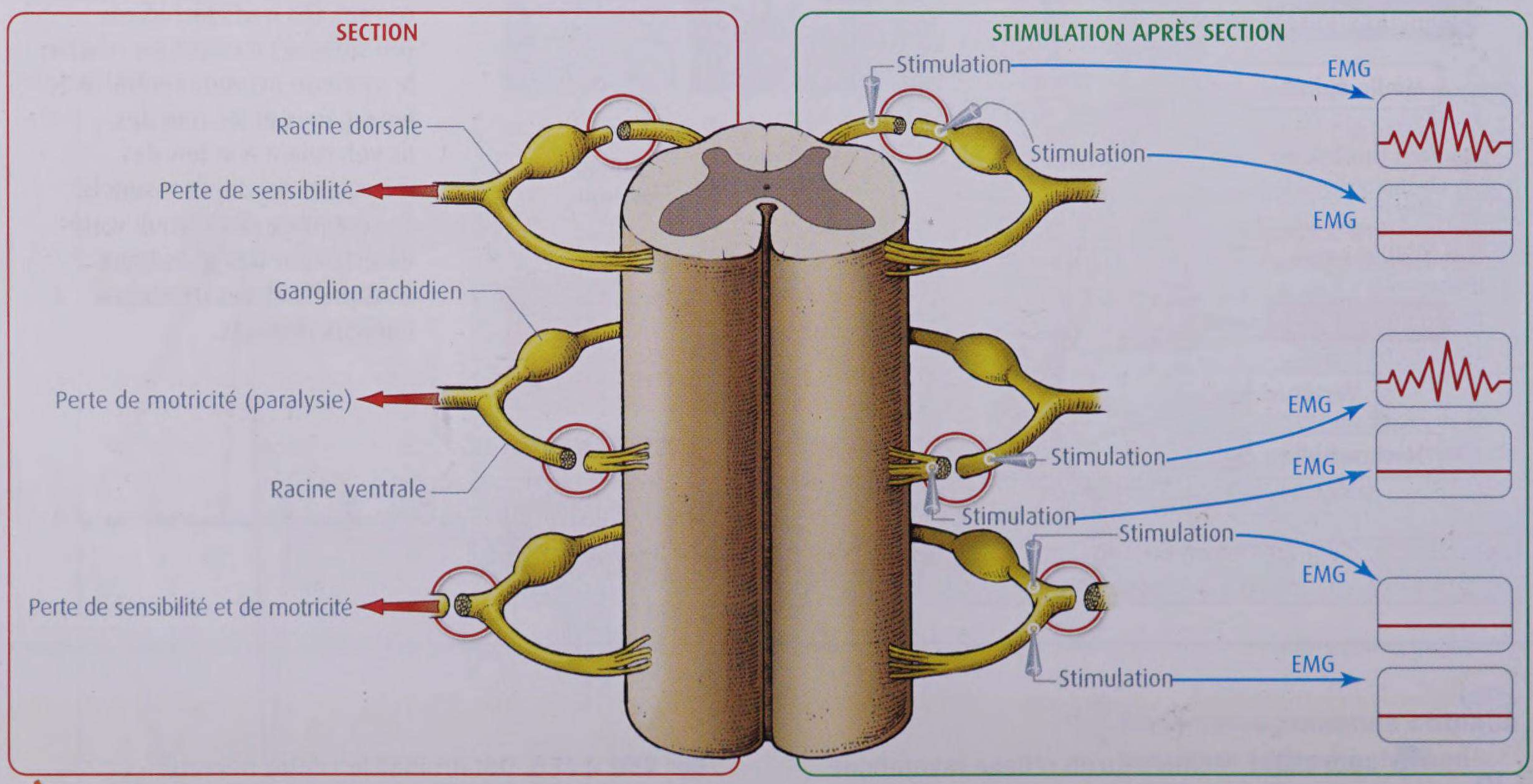
Un réflexe myotatique implique un muscle, un centre nerveux ainsi que des messages nerveux sensitifs et des messages nerveux moteurs circulant entre la moelle épinière et le muscle.

Quelles sont les voies empruntées par les messages nerveux sensoriels et moteurs lors d'un réflexe myotatique ?

Le trajet des messages nerveux dans les nerfs rachidiens

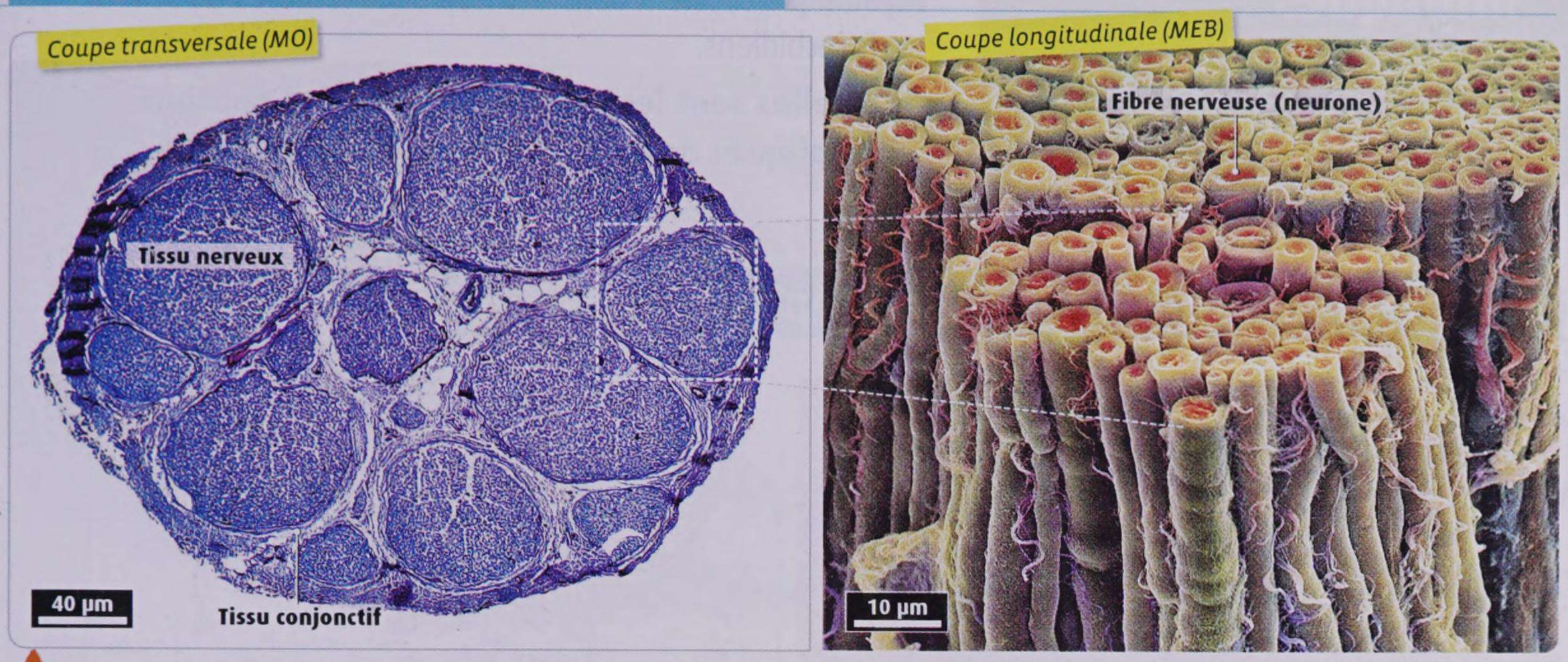


1 Coupe transversale de moelle épinière de rat (photographie par transparence). Chaque nerf rachidien est relié à la moelle épinière par une racine dorsale et par une racine ventrale. Les racines dorsales présentent des renflements appelés ganglions rachidiens.

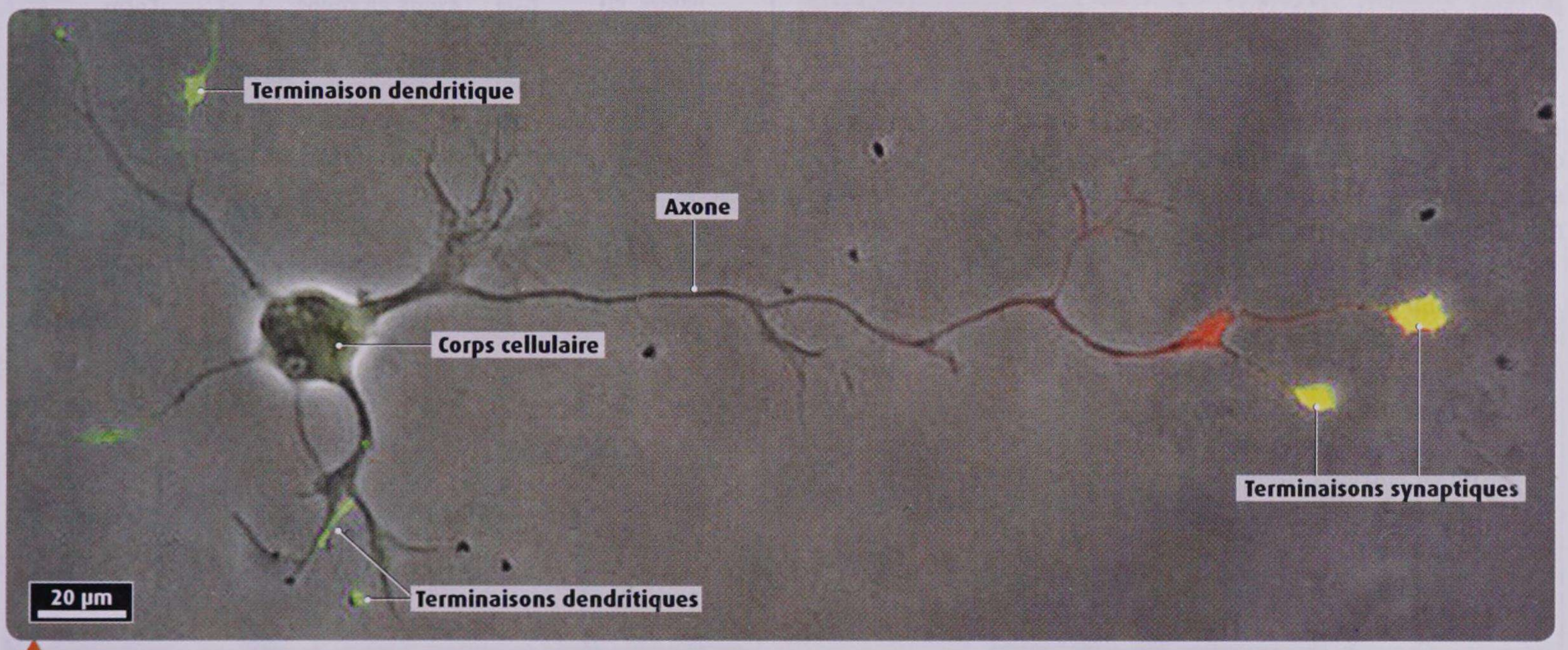


2 Des expériences de section et de stimulation des nerfs rachidiens. L'une des racines d'un nerf rachidien est sectionnée. On analyse alors la motricité et la sensibilité de la région innervée par le nerf sectionné. On stimule ensuite le nerf sectionné à différents endroits et l'on enregistre l'activité électrique (électromyogramme, EMG) au niveau des muscles innervés par ce dernier. Ces expériences ont été réalisées dès 1822 par F. Magendie, qui étudiait le réflexe de rétraction de la patte chez le chien. N'ayant pas accès à l'EMG, il évaluait l'effet d'une stimulation après section en observant directement la mobilité de la patte.

L'organisation des nerfs rachidiens



3 Un nerf rachidien observé en coupe transversale et en coupe longitudinale.
Un nerf est formé de deux tissus : le tissu nerveux, qui contient les neurones (également qualifiés de fibres nerveuses), et le tissu conjonctif. Ce dernier entoure les fibres nerveuses et contient des vaisseaux sanguins assurant l'irrigation du nerf.



4 Neurone du cerveau d'un rat (vu au MO).
Des informations variées arrivent par les terminaisons dendritiques du neurone (ou dendrites, marquées en vert), qui constituent le pôle afférent. Ces informations sont intégrées au niveau du corps cellulaire (contenant le noyau du neurone) et peuvent se traduire par l'émission d'un message nerveux qui emprunte l'axone jusqu'à l'arborisation terminale (pôle efférent). Chaque extrémité de l'arborisation, ou terminaison synaptique (marquée en jaune), est en contact avec un autre neurone. Le contact entre une terminaison synaptique d'un premier neurone et une terminaison dendritique (ou le corps cellulaire) d'un second neurone est une synapse. Celle-ci peut permettre la transmission du message nerveux du premier neurone au second. Les différents neurones de l'organisme sont tous des cellules polarisées, mais leur organisation présente d'importantes variations d'un type de neurone à l'autre.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Déterminez le trajet emprunté par les messages nerveux sensoriels et par les messages nerveux moteurs lors d'un réflexe myotatique.

2 **DOC. 3 ET 4.** Réalisez un schéma de la structure d'un nerf et de celle d'un neurone. Expliquez pourquoi cette cellule est dite polarisée.

3 **DOC. 3.** Expliquez comment un même nerf peut transmettre à la fois des messages nerveux sensoriels et moteurs.

4 **EN CONCLUSION.** Précisez et complétez le schéma fonctionnel d'un réflexe myotatique construit dans l'unité précédente.

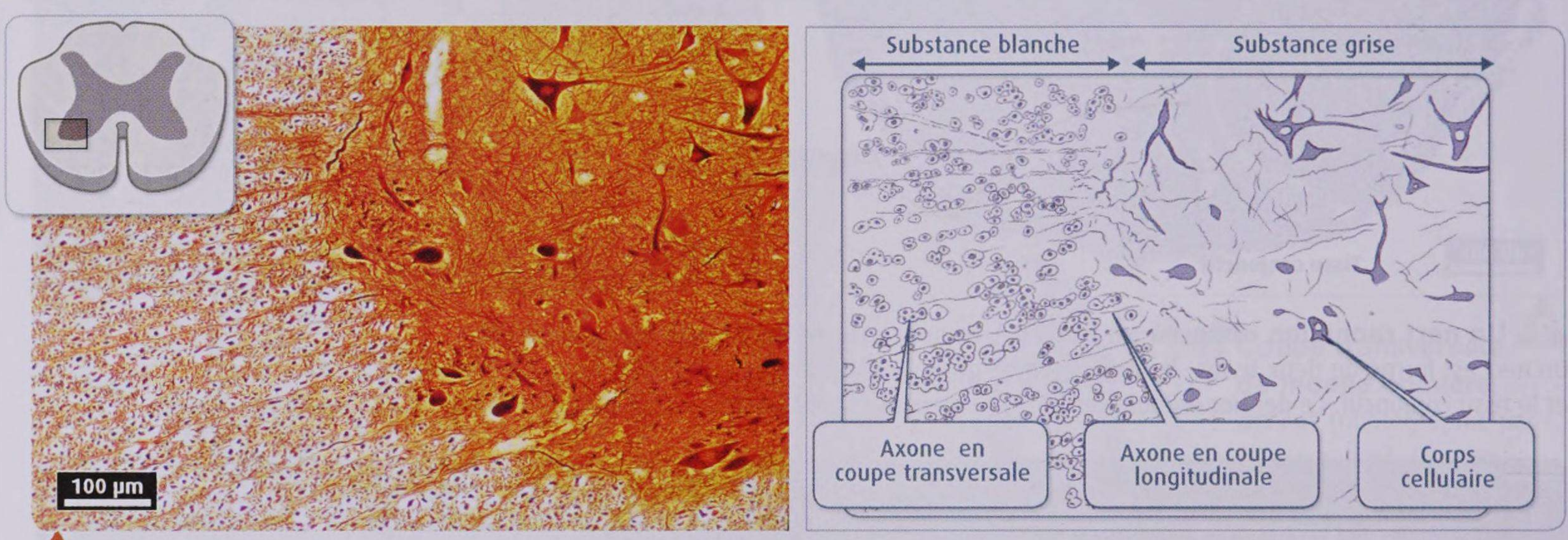
UNITÉ 3

Les neurones impliqués dans un réflexe myotatique

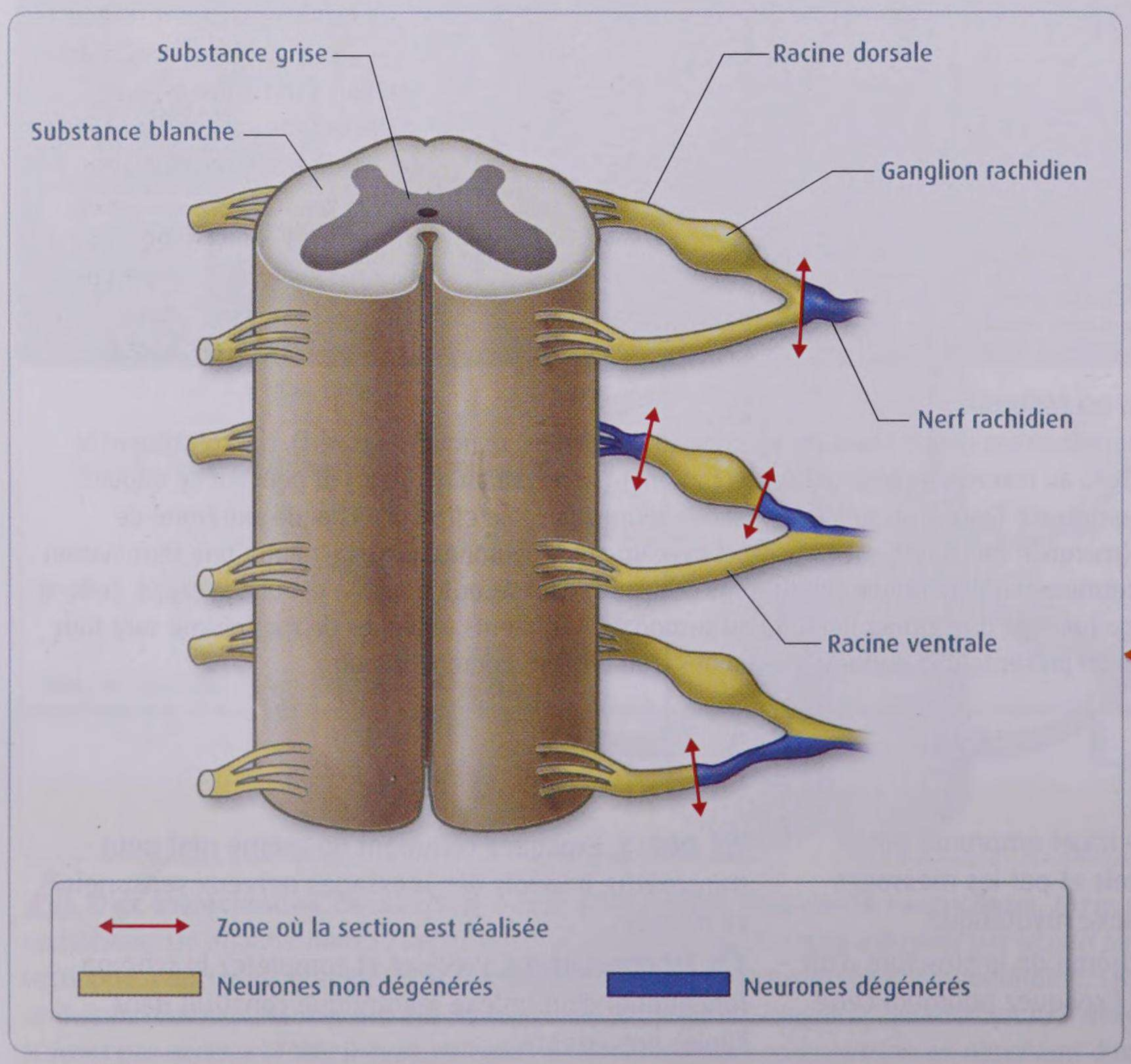
Les messages nerveux sensoriels et moteurs d'un réflexe myotatique circulent dans des neurones localisés au sein de nerfs rachidiens.

Quelles sont les caractéristiques des neurones impliqués dans un réflexe myotatique ?

Des observations dans la moelle épinière

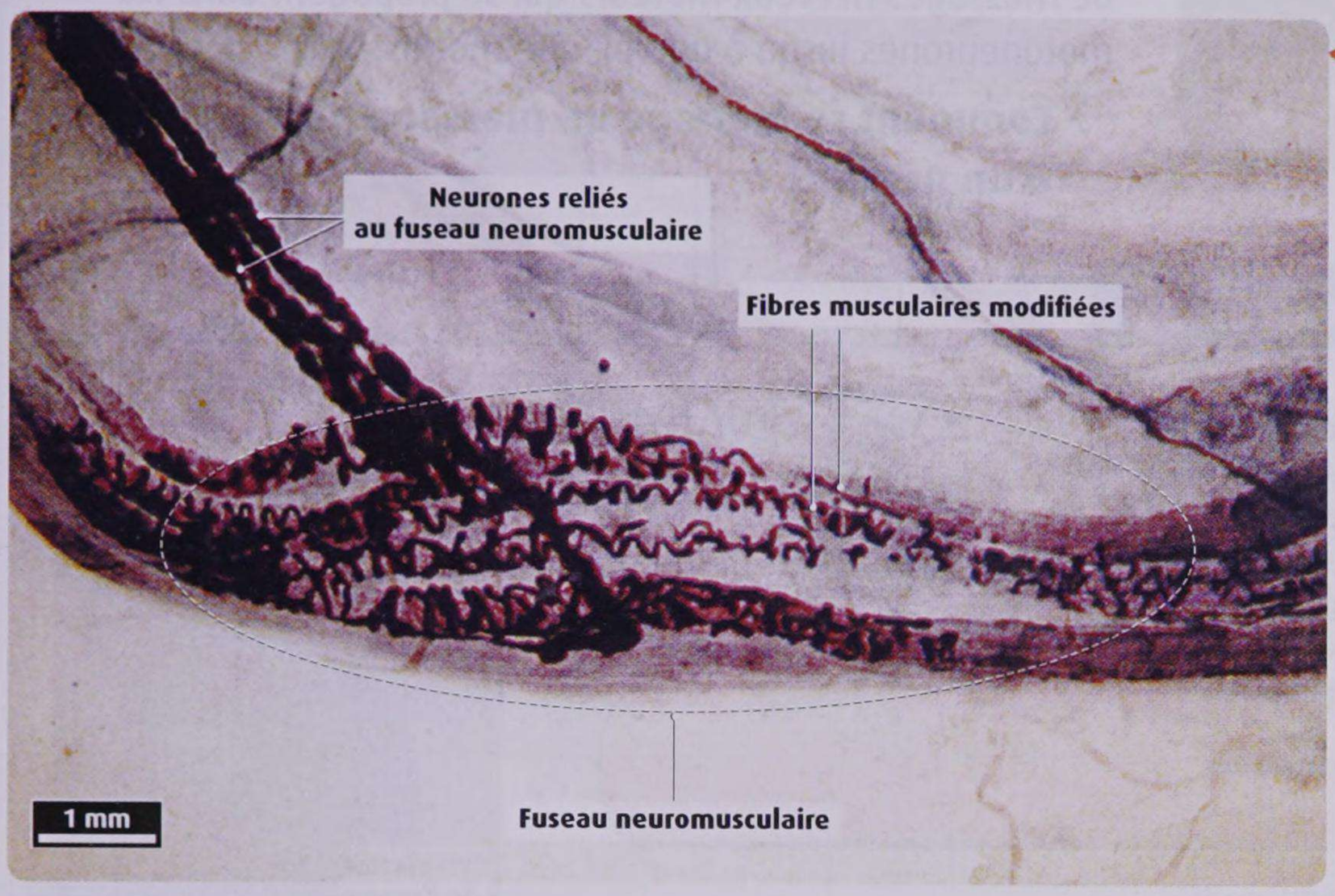


1 Coupe transversale de moelle épinière observée au MO et dessin interprétatif. La substance blanche n'est constituée que d'axones de neurones. Certains d'entre eux se prolongent dans les nerfs rachidiens. La substance grise contient essentiellement des corps cellulaires de neurones. On observe également des corps cellulaires de neurones dans les ganglions rachidiens (non visibles sur cette coupe).

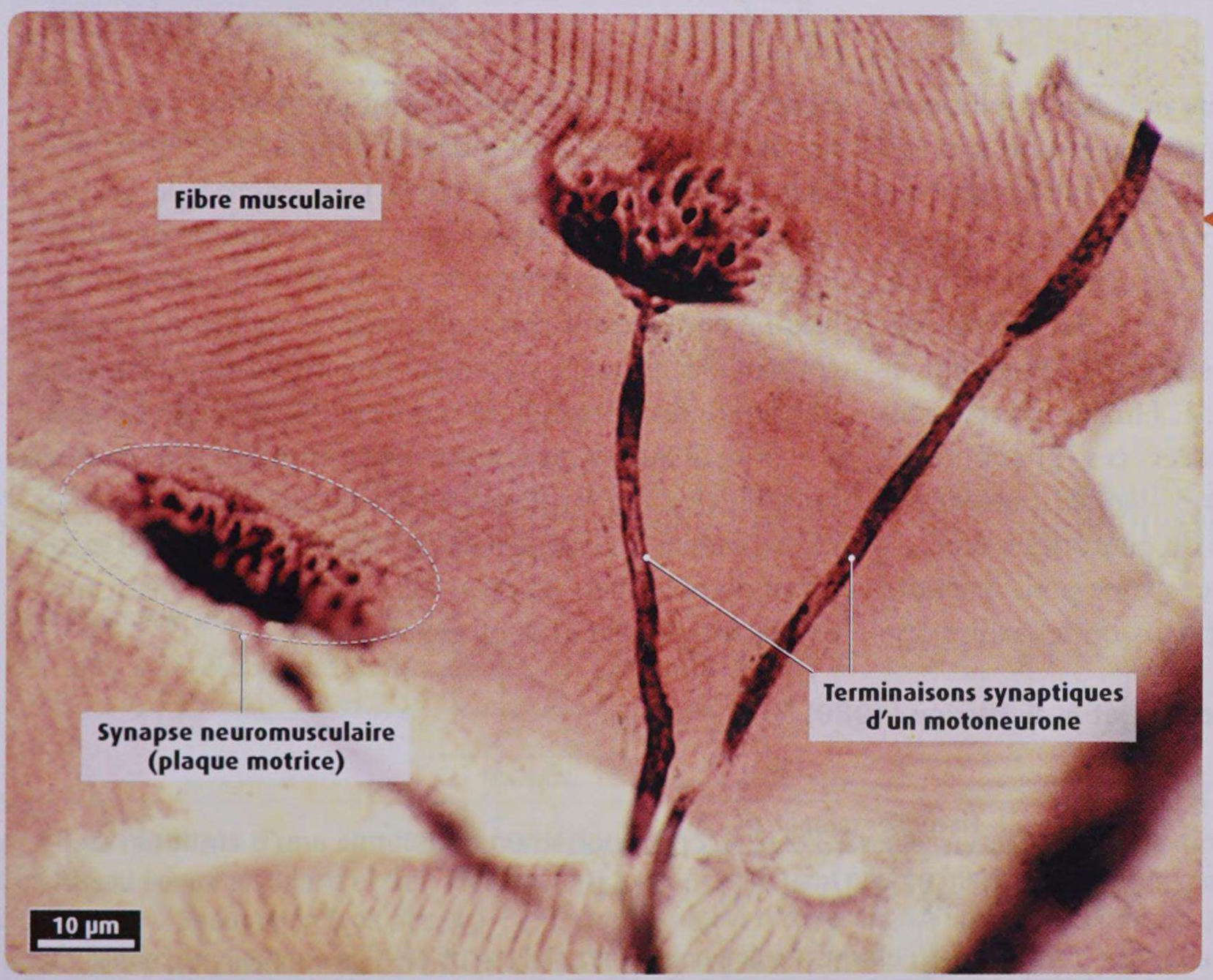


2 Les conséquences à long terme de la section des nerfs rachidiens au niveau de la moelle épinière. Des nerfs rachidiens sont sectionnés à différents endroits. On suit alors le devenir des neurones contenus dans le nerf. Lorsqu'un neurone est sectionné, la partie contenant le corps cellulaire survit, tandis que l'autre extrémité dégénère.

Des observations au niveau des muscles



3 Un fuseau neuromusculaire. (vu au MO). Il s'agit d'une capsule disposée parallèlement aux fibres musculaires. Elle contient des fibres musculaires modifiées autours desquelles sont enroulées les terminaisons dendritiques de neurones à l'organisation particulière : ces terminaisons sont directement en contact avec l'axone ; cet axone emprunte un nerf rachidien jusqu'à un ganglion rachidien (où est localisé le corps cellulaire) puis gagne la moelle épinière par la racine dorsale du nerf. L'étirement du muscle est l'origine d'un message nerveux dans ces neurones.



4 Une plaque motrice (vue au MO). Certains neurones des nerfs rachidiens sont qualifiés de motoneurones. À proximité des fibres musculaires, un motoneurone se ramifie et forme de nombreuses terminaisons synaptiques. Chacune d'entre elle est en contact avec une fibre musculaire, formant une synapse neuromusculaire ou plaque motrice. Chaque motoneurone est ainsi en contact avec de nombreuses fibres musculaires. Lorsqu'un message nerveux parvient aux différentes terminaisons synaptiques, il commande la contraction simultanée des fibres musculaires en contact avec ces terminaisons.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Déterminez la localisation du corps cellulaire et la nature des terminaisons dendritiques d'un neurone sensoriel impliqué dans un réflexe myotatique.

2 **DOC. 1, 2 ET 4.** Déterminez la localisation du corps cellulaire et la nature des terminaisons synaptiques d'un neurone moteur impliqué dans un réflexe myotatique.

3 **EN CONCLUSION.** Sachant qu'un réflexe myotatique n'implique qu'une seule synapse dans la substance grise de la moelle épinière, précisez et complétez le schéma fonctionnel d'un réflexe myotatique construit dans l'unité précédente.

UNITÉ 4

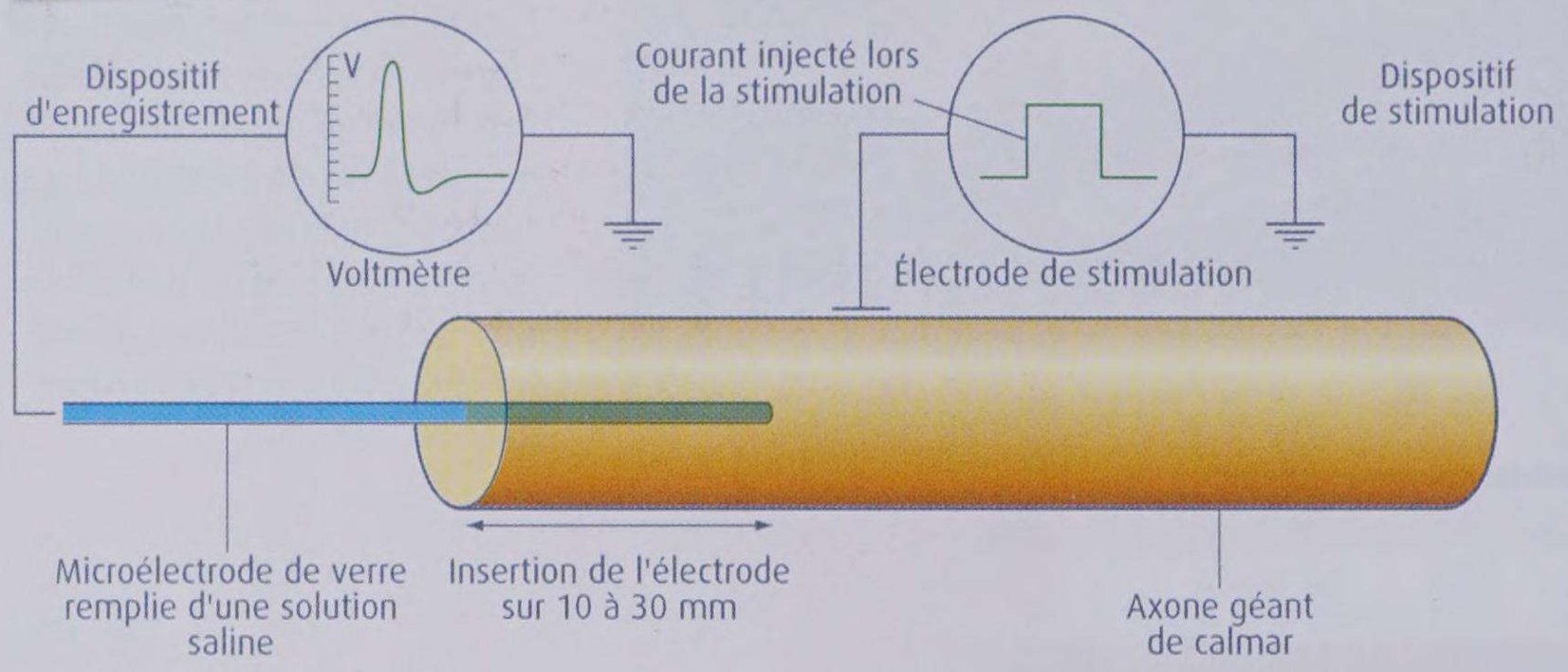
Nature et transmission du message nerveux

Lors d'un réflexe myotatique, l'étirement du muscle induit l'émission de messages nerveux sensoriels, puis l'émission de messages nerveux moteurs qui se propagent dans les motoneurones jusqu'à une plaque motrice.

Comment se propage un message nerveux le long d'un neurone ?

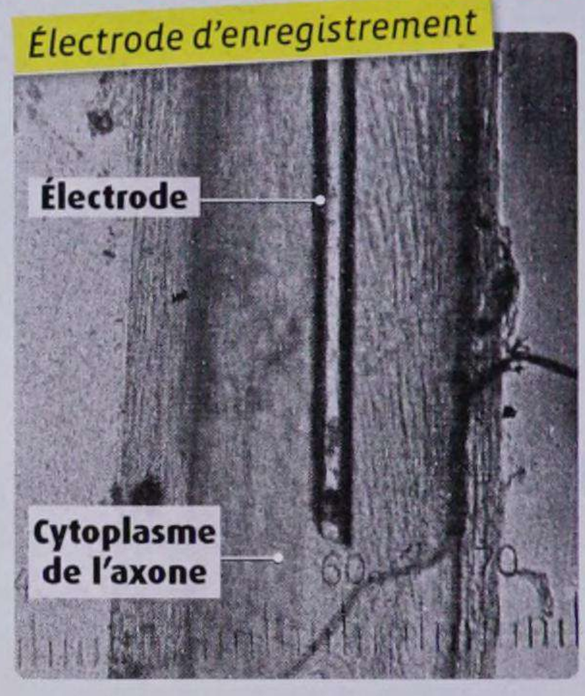
Les propriétés des neurones

Dispositif expérimental

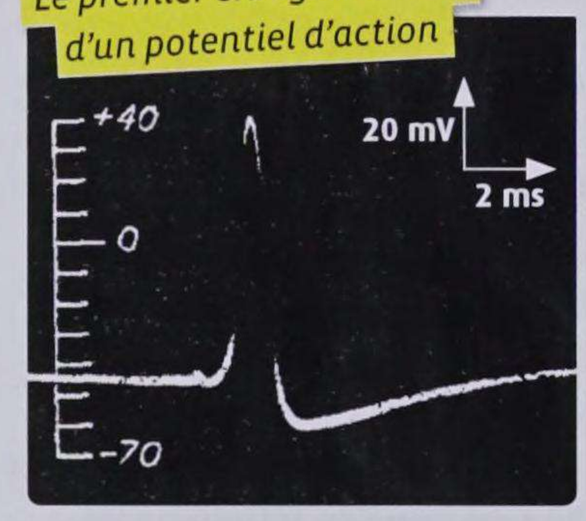


HISTOIRE DES SCIENCES

Électrode d'enregistrement

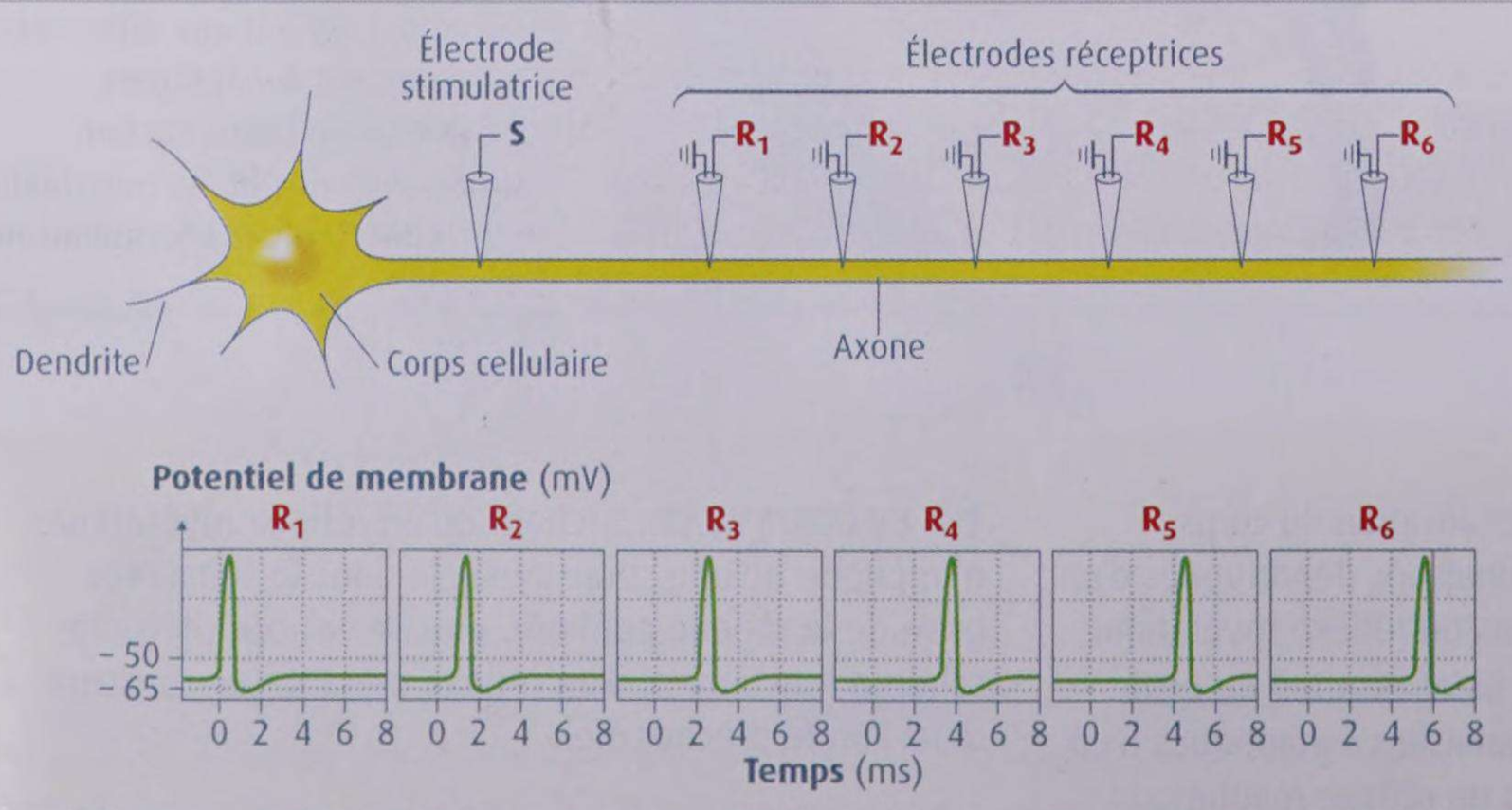


Le premier enregistrement d'un potentiel d'action



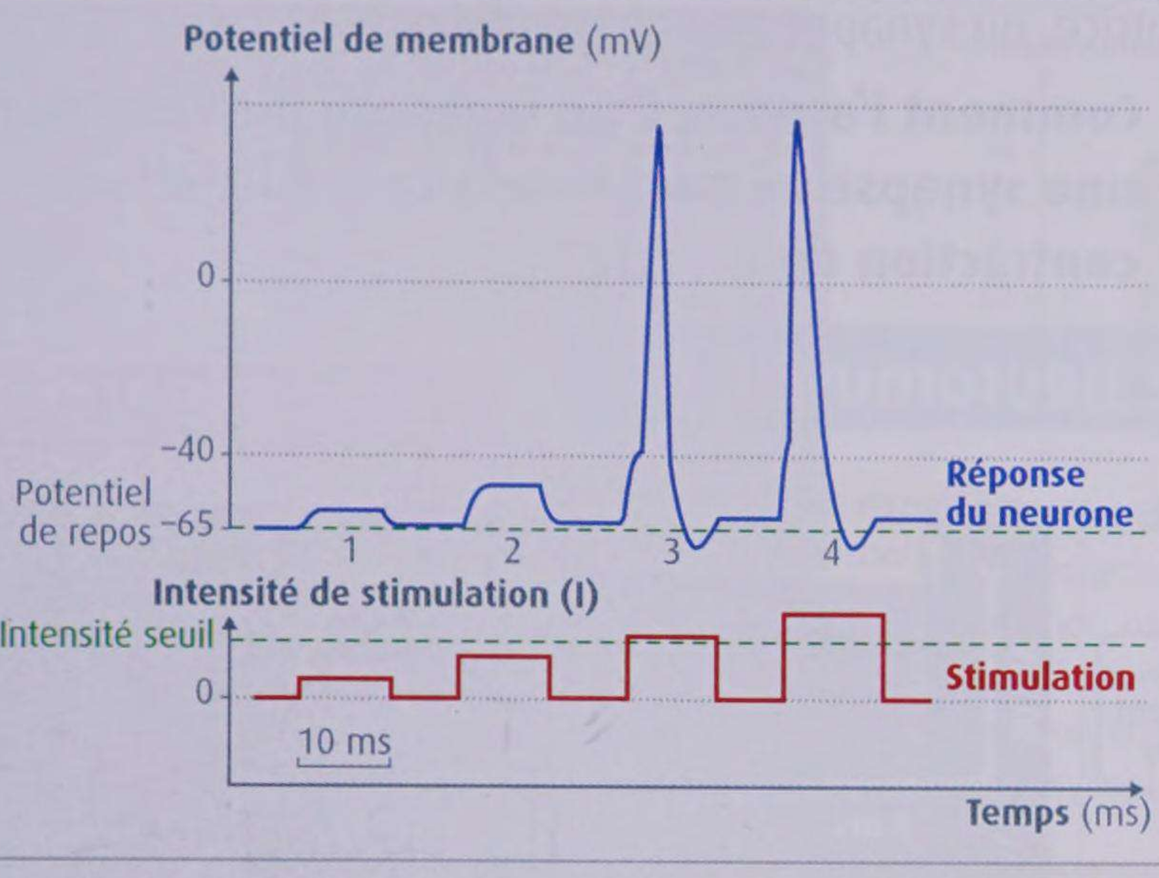
Au XIXe siècle, plusieurs expériences ont montré que des différences de potentiel se propageaient le long d'un nerf stimulé. En 1939, deux physiologistes, A. L. Hodgkin et A. F. Huxley vont caractériser ces phénomènes électriques à l'échelle du neurone. L'année précédente, on a mis en évidence l'existence de neurones « géants » chez le calmar : le diamètre de leur axone peut atteindre 0,8 mm. Les chercheurs insèrent dans un tel axone une électrode miniaturisée permettant de mesurer le potentiel de membrane, c'est-à-dire la différence de potentiel (ddp) entre le cytoplasme et la face externe de la cellule. Au repos (sans stimulation), ils mesurent une ddp négative : c'est le potentiel de repos. Ils stimulent ensuite l'axone en injectant pendant quelques millisecondes un courant électrique. Ils observent une inversion brusque et transitoire du potentiel de membrane : c'est le potentiel d'action. D'autres expériences vont montrer que toutes les cellules vivantes possèdent un potentiel de repos (sa valeur varie d'un type de cellule à l'autre), alors que l'existence de potentiels d'action est spécifique aux neurones et aux autres cellules dites excitables.

1 Les expériences de A. L. Hodgkin et A. F. Huxley (1939).



2 D'autres expériences sur l'axone géant de calmar. Un axone géant de calmar reçoit une brève stimulation électrique, puis le potentiel de membrane est enregistré à des distances croissantes de l'électrode de stimulation.

La nature du message nerveux



3 Enregistrement du potentiel de membrane d'un neurone isolé suite à des stimulations d'intensité croissante. Les réponses 1 et 2 ne se propagent pas le long de l'axone. Un enregistrement identique aux réponses 3 et 4 est obtenu dès que l'intensité de stimulation dépasse une valeur appelée seuil de stimulation.

TP J'UTILISE LE LOGICIEL SHERRINGTON*

▸ Faites pivoter la table à l'aide du curseur.
▸ Observez la variation de tension correspondante.
▸ Choisissez une tension et démarrez l'enregistrement.
▸ Calculez la fréquence des potentiels d'action pour les neurones sensoriels et pour les motoneurones.
▸ Répétez l'expérience avec deux autres tensions.

**http://www.ac-nice.fr/svt/productions/fiche.php?numero=25.*

4 Les résultats d'une simulation numérique. On simule ici les variations du potentiel de membrane d'un neurone sensoriel issu d'un fuseau neuromusculaire et d'un motoneurone lors de l'étirement plus ou moins intense d'un muscle à l'aide du dispositif expérimental utilisé par C. S. Sherrington (voir doc. 5 p. 329). Chaque trait vert correspond à un potentiel d'action. En situation physiologique, la stimulation d'un neurone au-delà du seuil de stimulation induit l'émission d'une succession (ou train) de potentiels d'action.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Expliquez l'intérêt de l'axone de calmar pour l'étude de la transmission du message nerveux.
2 **DOC. 1. À 3.** Déterminez les caractéristiques de la réponse d'un neurone à une stimulation.
3 **DOC. 3. ET 4.** Justifiez l'expression suivante : « Au niveau d'un neurone, le message nerveux est codé en fréquence de potentiels d'action. »
4 **EN CONCLUSION.** Récapitulez la nature et les caractéristiques du message nerveux qui se propage le long d'un neurone.

UNITÉ 5

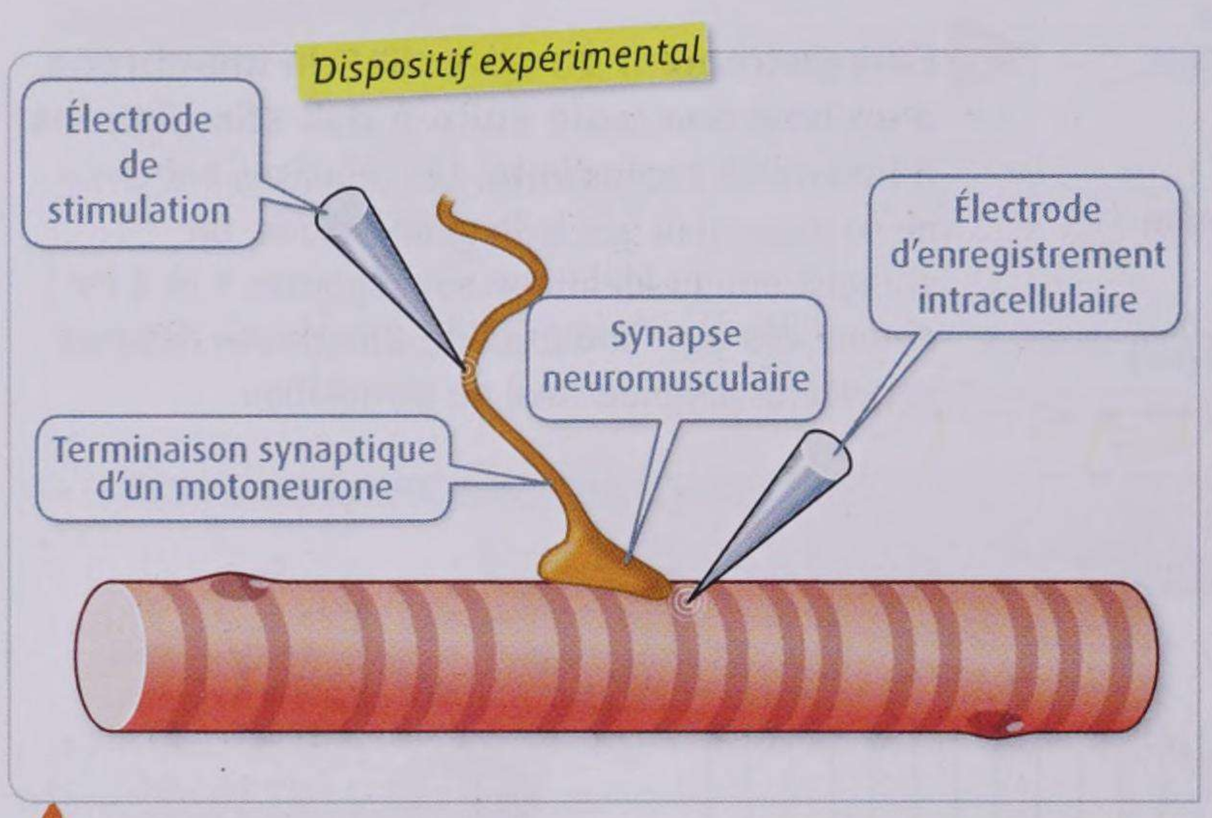
Le fonctionnement de la synapse neuromusculaire

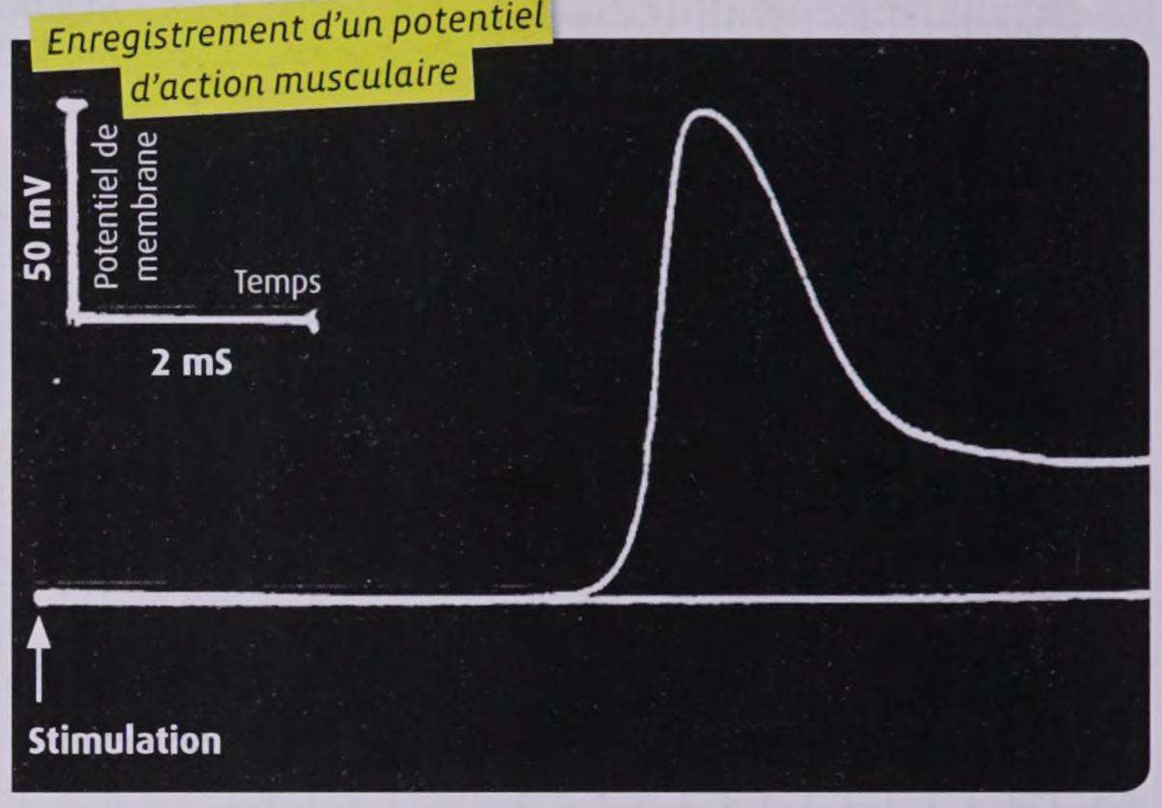
Chaque terminaison synaptique d'un motoneurone est en contact avec une fibre musculaire au niveau d'une plaque motrice, ou synapse neuromusculaire.

Comment l'arrivée d'un message nerveux dans une synapse neuromusculaire induit-elle la contraction du muscle ?

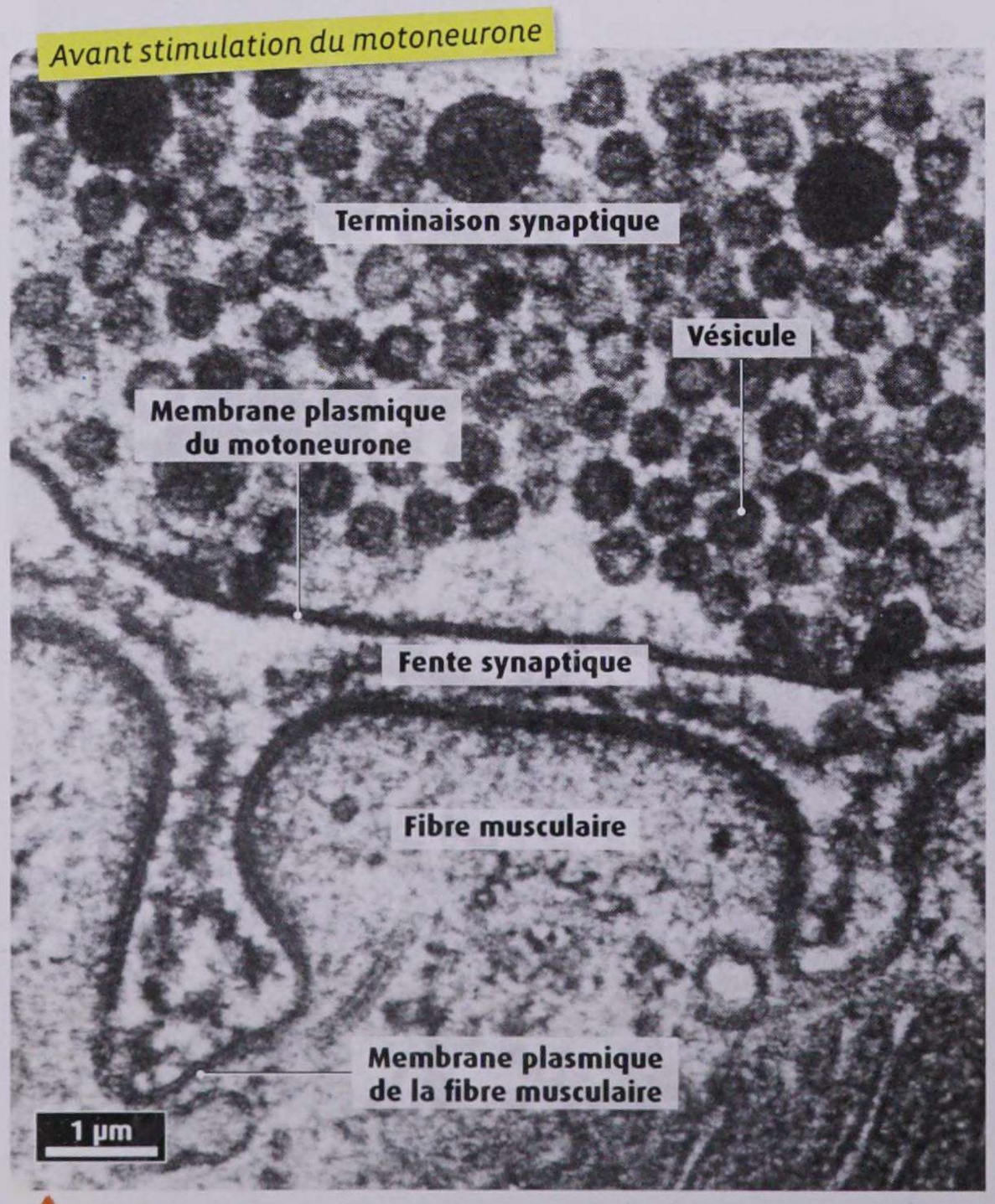
Le fonctionnement d'une synapse neuromusculaire

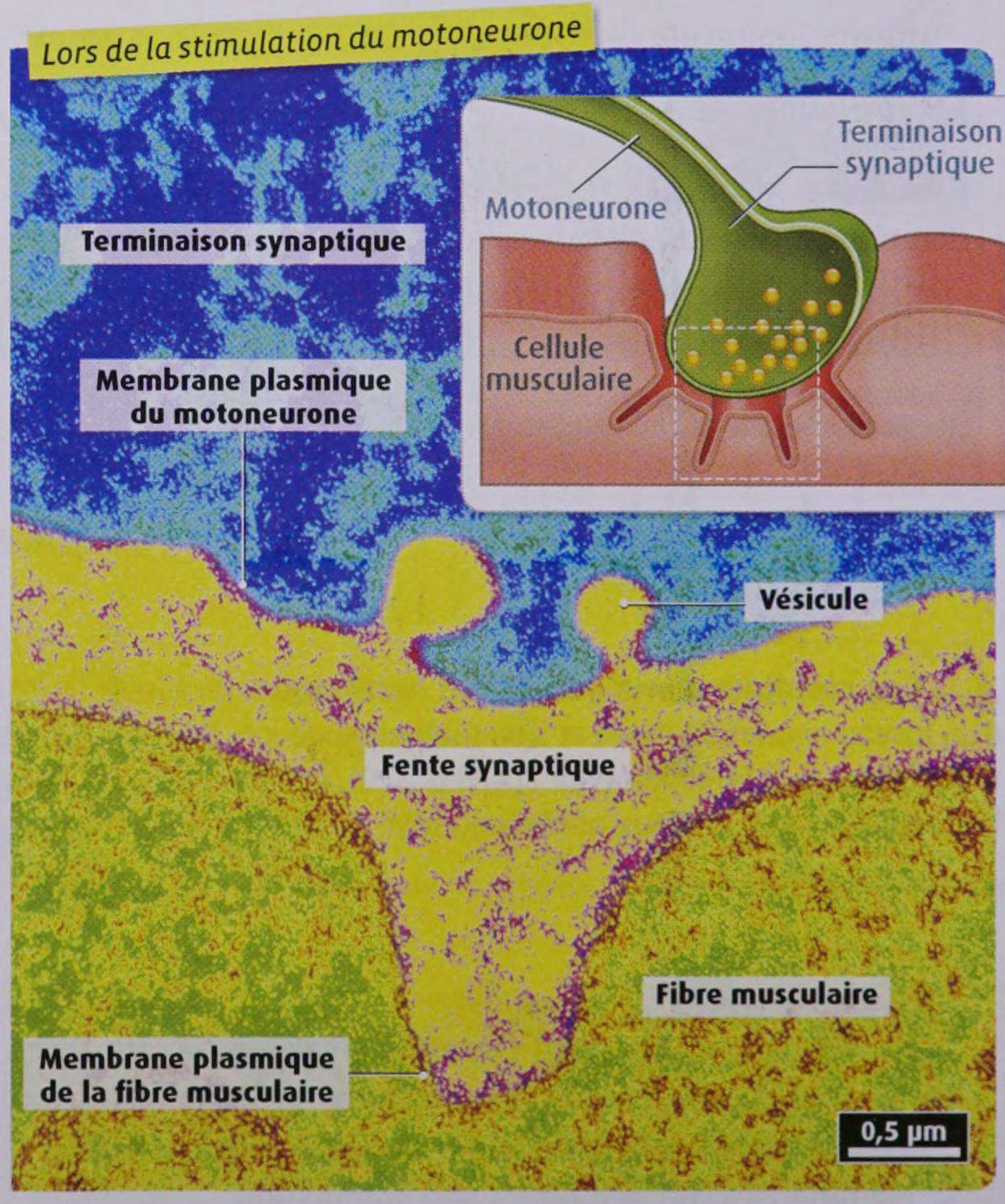
HISTOIRE DES SCIENCES





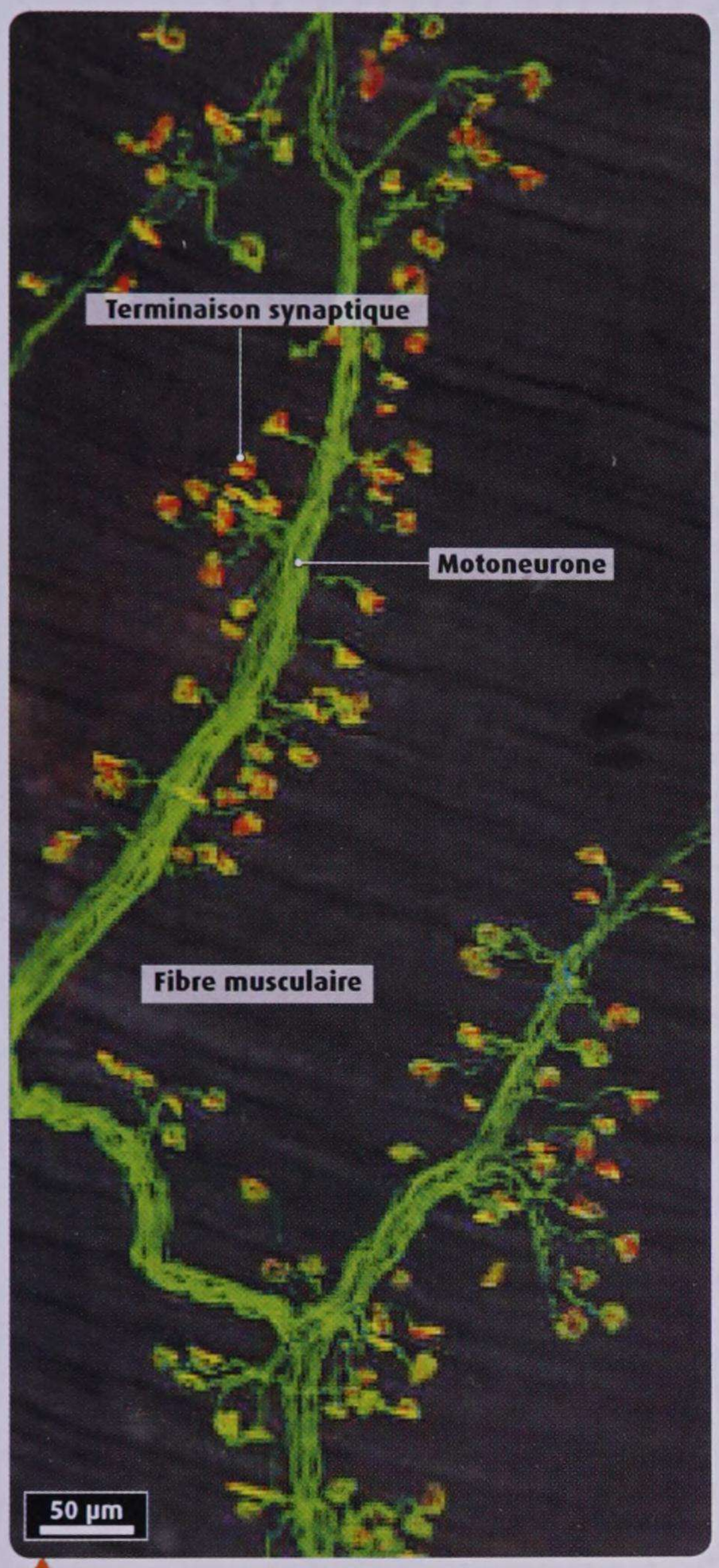
1 La mise en évidence du potentiel d'action musculaire. En 1950, B. Katz étudie des synapses neuromusculaires sur des muscles de grenouille. Il observe que la stimulation d'un motoneurone induit une variation transitoire du potentiel de membrane de la fibre musculaire : c'est le potentiel d'action musculaire. Il montre que ce dernier déclenche la contraction du muscle.



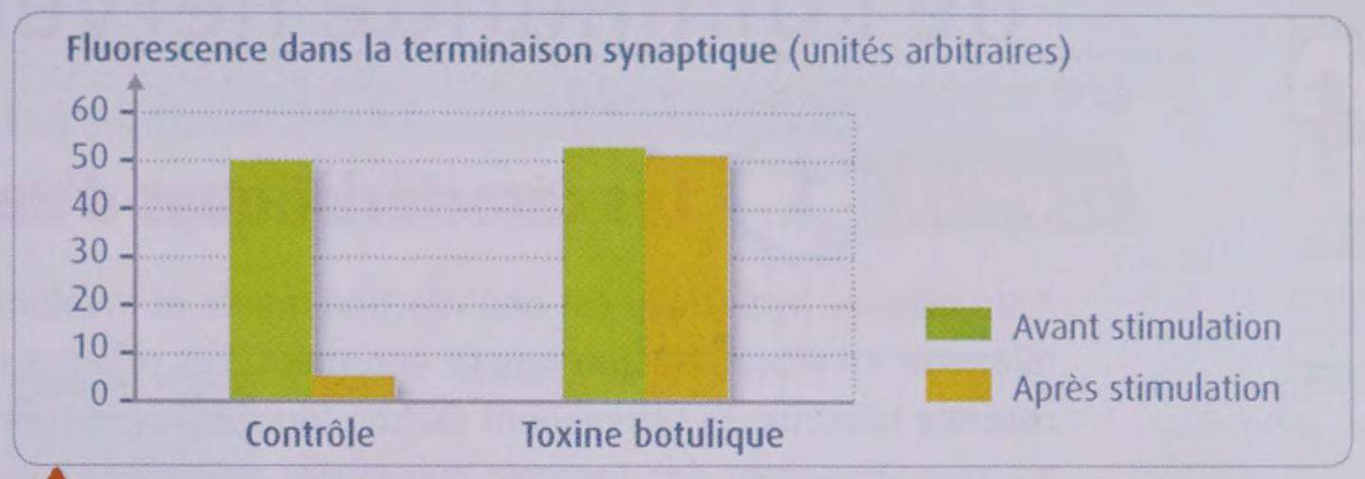


2 Une synapse neuromusculaire observée au MET. La terminaison synaptique des motoneurones contient des vésicules remplies d'une molécule : l'acétylcholine. Ces vésicules, dites pré-synaptiques, peuvent fusionner avec la membrane plasmique et libérer l'acétylcholine dans la fente synaptique : c'est le phénomène d'exocytose des vésicules. L'acétylcholine est un neuromédiateur.

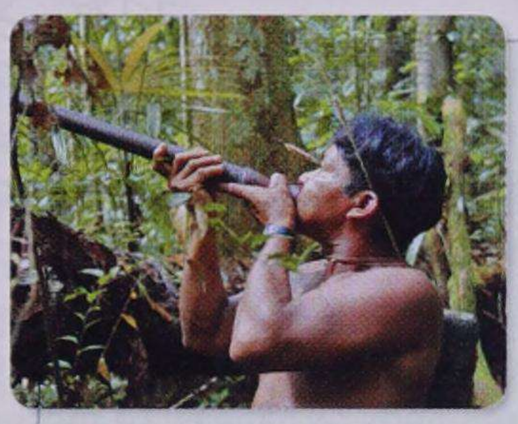
La transmission du message nerveux au muscle



3 Muscle de grenouille observé au microscope optique. On a montré l'existence, sur la membrane plasmique des fibres musculaires, de récepteurs de l'acétylcholine : ce sont des protéines fixant avec une très grande affinité cette molécule. Le récepteur de l'acétylcholine a ici été marqué en rouge et le neurone moteur en vert. Le mélange des deux marquages donne une couleur jaune-orange.

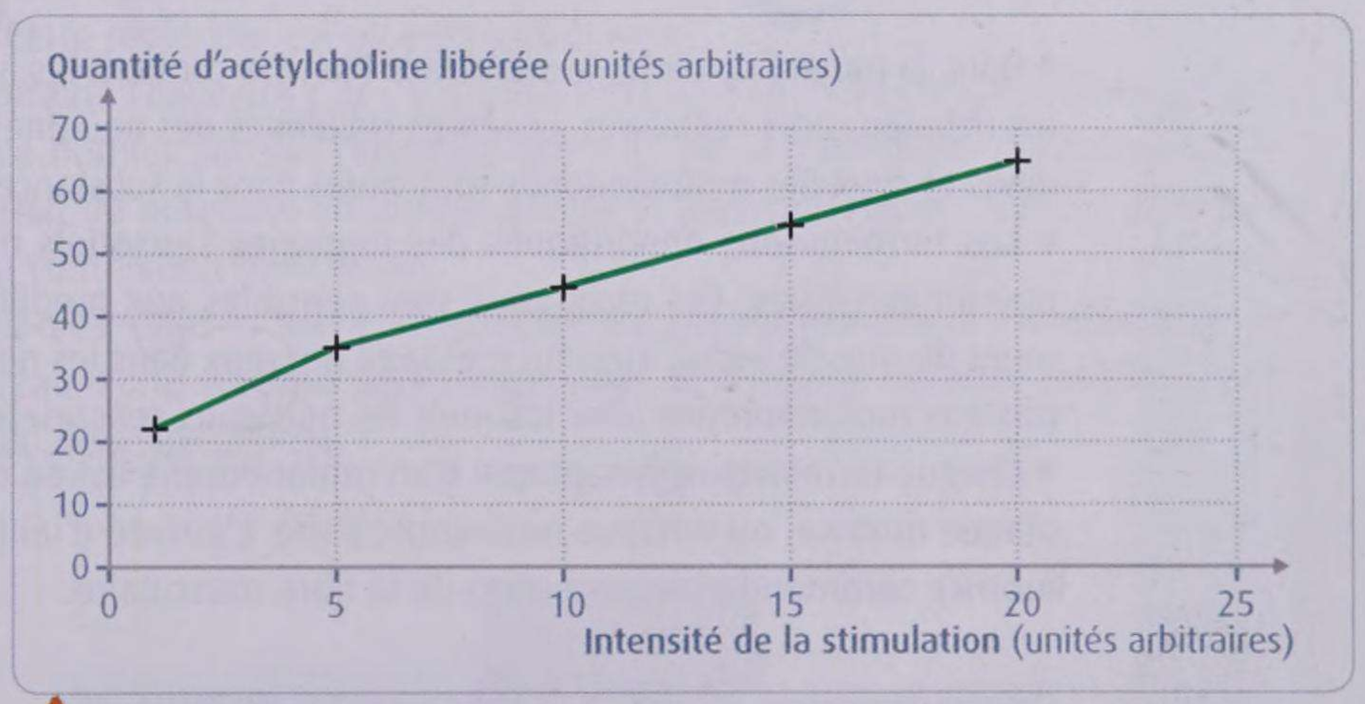


4 L'effet de la toxine botulique sur la jonction neuromusculaire. Cette toxine bactérienne provoque une paralysie musculaire. Dans cette expérience, on marque les vésicules pré-synaptiques de motoneurones de grenouille avec un colorant fluorescent. Ces neurones sont placés dans un milieu contenant ou non la toxine botulique. La fluorescence à l'intérieur du bouton synaptique est quantifiée avant et après stimulation du neurone.



Le curare est un poison mortel utilisé par les Indiens d'Amérique pour chasser. Il provoque de graves paralysies musculaires. En 1952, B. Katz incube un muscle de grenouille avec du curare et stimule l'un des motoneurones qui l'innerve. Il observe que la stimulation ne se traduit pas par l'apparition d'un potentiel d'action musculaire. D'autres études ont montré que le curare se fixe sur les récepteurs de l'acétylcholine.

5 L'effet du curare.



6 Quantité d'acétylcholine libérée par les terminaisons synaptiques de neurones soumis à une stimulation d'intensité croissante.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Les potentiels d'action se propagent à la vitesse de 50 $m.s^{-1}$. Calculez la distance parcourue par le message nerveux entre l'électrode de stimulation et celle d'enregistrement. Concluez.

2 **DOC. 2 À 5.** Mettez en relation les documents pour déterminer la séquence des événements depuis l'arrivée d'un message nerveux dans la terminaison synaptique du motoneurone jusqu'à la contraction musculaire.

3 **DOC. 6.** Justifiez l'expression suivante : « Au niveau d'une synapse neuromusculaire, le message nerveux est codé en concentration de neuromédiateur. »

4 **EN CONCLUSION.** Représentez sous la forme d'un schéma les différentes étapes du fonctionnement d'une synapse neuromusculaire.

UNITÉS

BILAN DES

CHAPITRE 1

Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle

UNITÉ 1 Les caractéristiques d'un réflexe myotatique

- Un réflexe myotatique est une réaction rapide et involontaire du corps : un muscle se contracte automatiquement en réponse à son propre étirement. Les réflexes myotatiques sont, comme tous les réflexes, sous contrôle nerveux. Ils témoignent du bon fonctionnement de système neuromusculaire.
- L'enregistrement des courants électriques associés à la contraction musculaire permet de montrer que le circuit nerveux d'un réflexe myotatique est plus court que celui d'une contraction volontaire d'un muscle. D'autres expériences montrent que la moelle épinière est le centre nerveux des réflexes myotatiques.

UNITÉ 2 Les voies nerveuses d'un réflexe myotatique

- La moelle épinière est reliée aux muscles grâce aux nerfs rachidiens. Ces derniers sont constitués de nombreux neurones, dont certains conduisent les messages nerveux associés à un réflexe myotatique.
- Les neurones sont des cellules polarisées comprenant des terminaisons dendritiques, un corps cellulaire, où est situé le noyau, et un prolongement cytoplasmique (l'axone) qui se ramifie en plusieurs terminaisons synaptiques.
- Des expériences de section et stimulation des nerfs rachidiens montrent que le message nerveux sensoriel d'un réflexe myotatique, remontant du muscle étiré vers la moelle épinière, est conduit par des neurones sensoriels empruntant les racines dorsales des nerfs rachidiens. Le message nerveux moteur, faisant le trajet inverse, est conduit par des neurones moteurs, ou motoneurones, passant par les racines ventrales des nerfs rachidiens.

UNITÉ 3 Les neurones impliqués dans un réflexe myotatique

- Dans la moelle épinière, la substance blanche contient les axones des neurones, tandis que la substance grise est riche en corps cellulaires. Les corps cellulaires des neurones sensoriels sont localisés dans les ganglions rachidiens et ceux des motoneurones sont situés dans la substance grise de la moelle épinière.
- Les terminaisons dendritiques des neurones sensoriels d'un réflexe myotatique sont reliées aux fuseaux neuromusculaires. Ces récepteurs sont sensibles aux modifications de l'état d'étirement du muscle. L'étirement du muscle induit ainsi un message nerveux dans les neurones sensoriels. Ce message nerveux est transmis aux motoneurones avec lesquels les neurones sensoriels sont en contact par l'intermédiaire de synapses.
- Chaque terminaison synaptique d'un motoneurone est en contact avec une fibre musculaire au niveau d'une plaque motrice, ou synapse neuromusculaire. L'arrivée d'un message nerveux moteur au niveau d'une plaque motrice commande la contraction de la fibre musculaire.

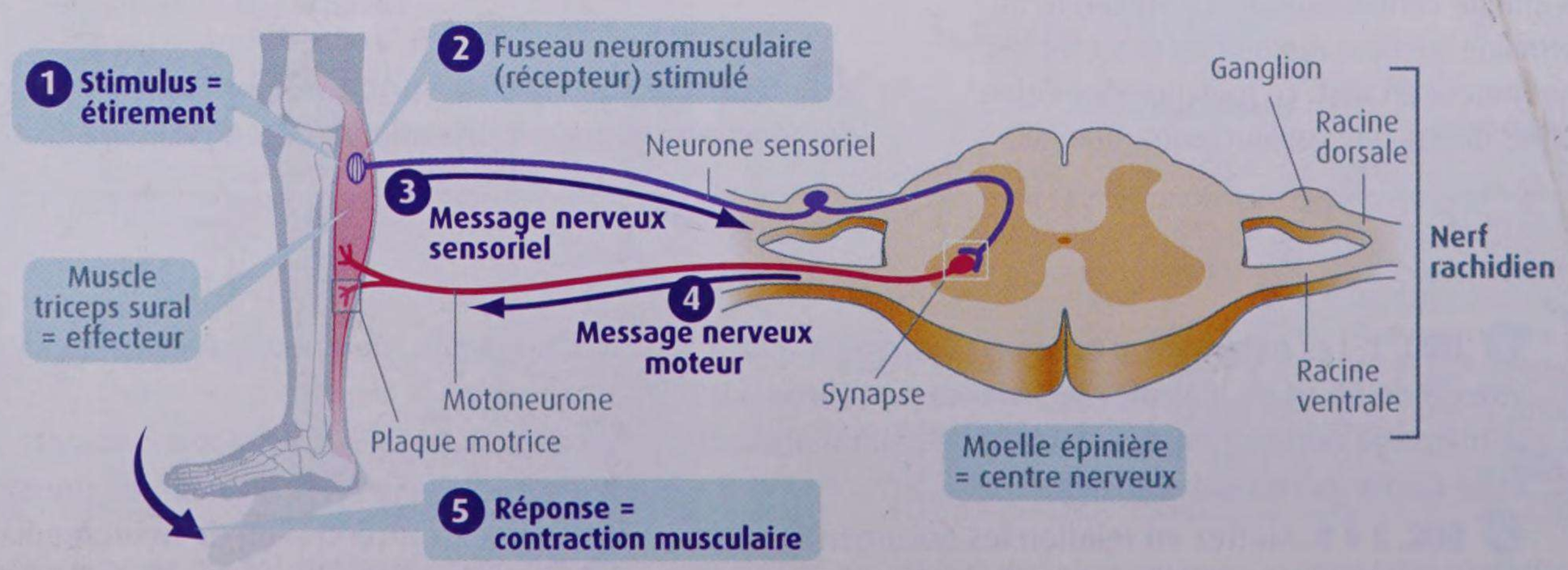
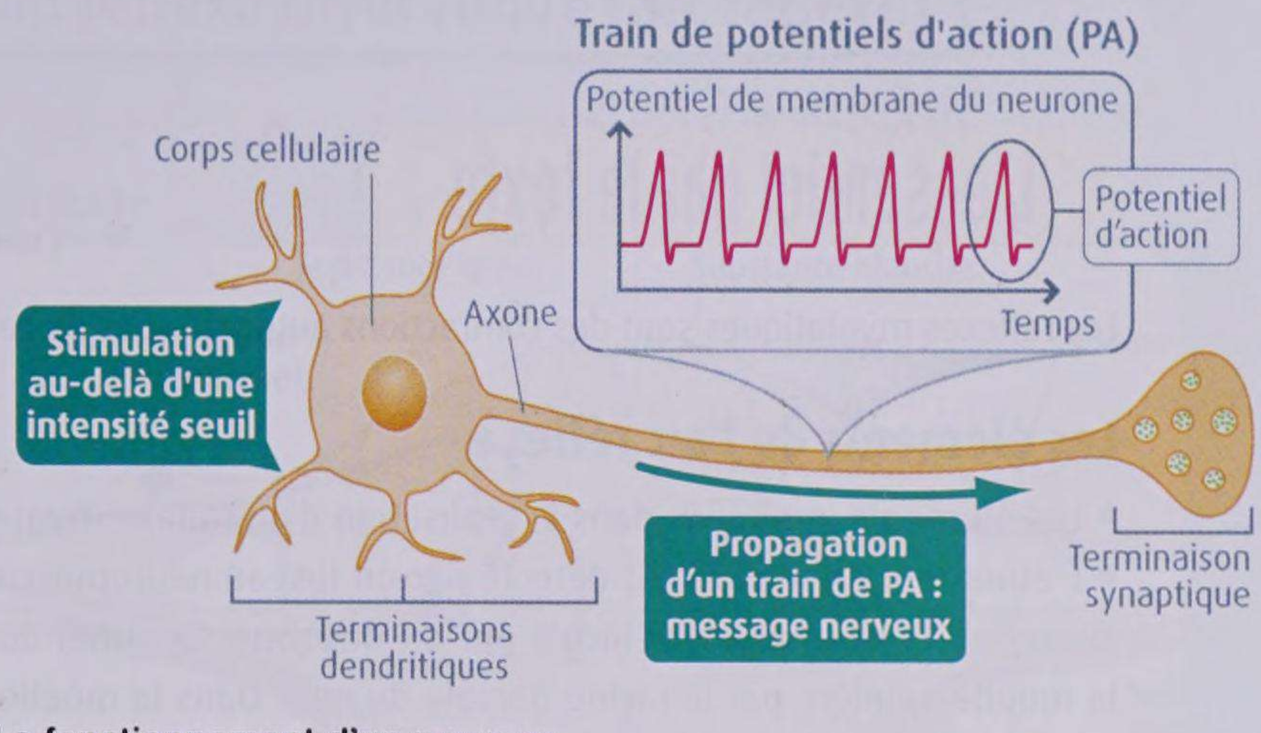


Schéma fonctionnel d'un réflexe myotatique (réflexe achilléen). L'ensemble des éléments impliqués dans la réalisation du réflexe constitue l'arc réflexe.

UNITÉ 4 Nature et transmission du message nerveux

• La différence de potentiel entre le cytoplasme et la face externe de la membrane plasmique du neurone définit le potentiel de membrane. En l'absence de stimulation, le potentiel de membrane vaut environ – 70 mV et constitue le potentiel de repos. Lorsque le neurone est stimulé, le potentiel de membrane peut varier transitoirement. Cette variation est un potentiel d'action.



Le fonctionnement d'un neurone.

• Le potentiel d'action n'est observé que si l'intensité de la stimulation du neurone dépasse une valeur seuil. Au-delà de cette valeur, le potentiel d'action conserve toujours les mêmes caractéristiques.

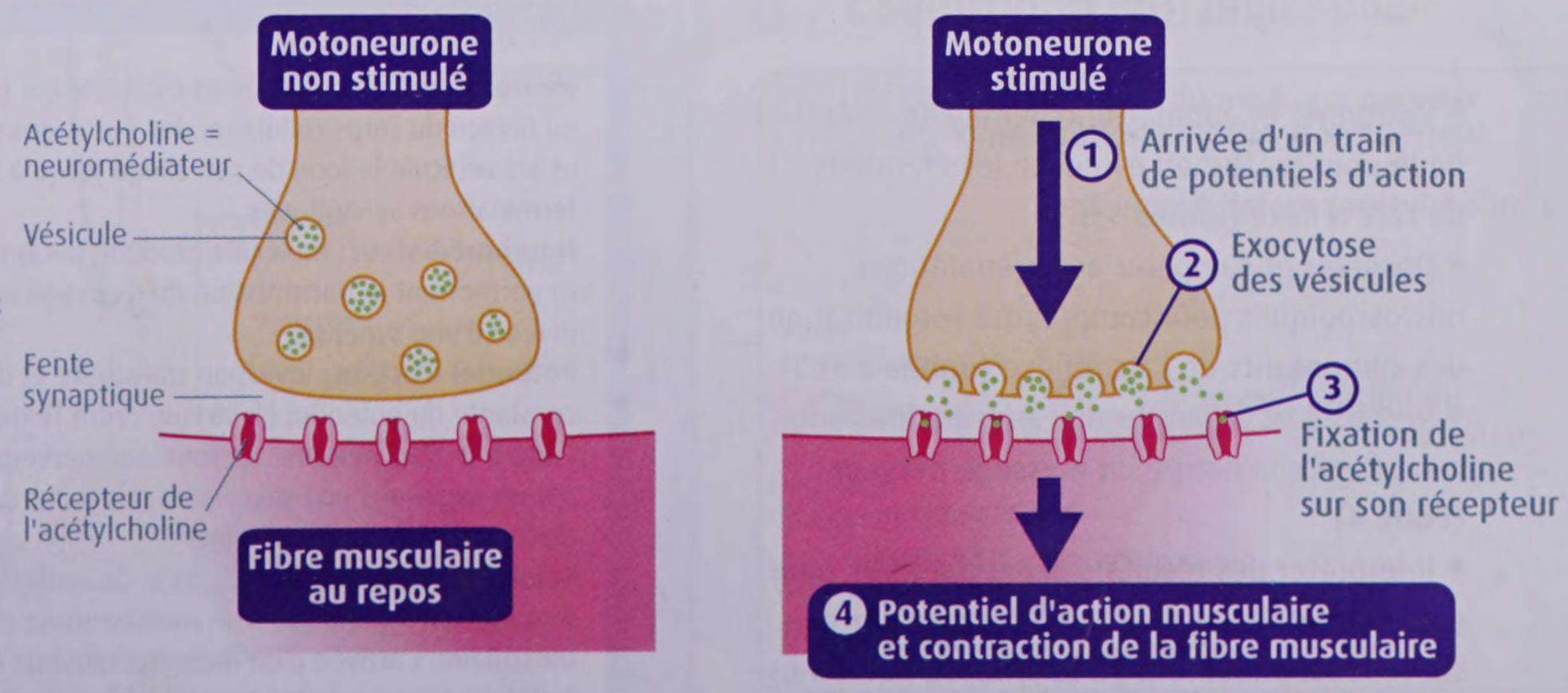
• La stimulation d'un neurone au-delà de la valeur seuil induit l'émission d'une succession (ou train) de potentiels d'action dont la fréquence est proportionnelle à l'intensité de stimulation. Ce train de potentiels d'action se propage le long de l'axone vers les terminaisons synaptiques. Il constitue le message nerveux. Celui-ci est donc codé électriquement en fréquence de potentiels d'action.

UNITÉ 5 Le fonctionnement de la synapse neuromusculaire

• Au niveau d'une synapse neuromusculaire, la terminaison synaptique du motoneurone contient des vésicules renfermant de l'acétylcholine. Cette molécule est un neuromédiateur.

• La stimulation du motoneurone entraîne l'exocytose des vésicules et la libération du neuromédiateur dans la fente synaptique. La fixation de ce dernier sur son récepteur, présent sur la membrane plasmique de la fibre musculaire, entraîne une variation du potentiel de membrane de la fibre musculaire : c'est le potentiel d'action musculaire, qui déclenche la contraction musculaire.

• La quantité de neuromédiateur libérée dans la fente synaptique est proportionnelle à l'intensité de la stimulation du motoneurone. Au niveau d'une synapse neuromusculaire, le message nerveux est donc codé chimiquement par la concentration du neuromédiateur.



Le fonctionnement d'une synapse neuromusculaire.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 1

Les réflexes myotatiques, un exemple de commande nerveuse du muscle

L'essentiel par le texte

Les réflexes myotatiques sont des contractions automatiques de certains muscles en réponse à leur propre étirement.

Les éléments de l'arc réflexe

- Les éléments impliqués dans la réalisation d'un réflexe myotatique constituent un arc réflexe.
- L'étirement du muscle est détecté par un fuseau neuromusculaire (récepteur), qui émet un message nerveux sensoriel. Ce dernier est véhiculé par un **neurone** sensoriel dont l'axone emprunte un nerf rachidien et gagne la moelle épinière par la racine dorsale du nerf. Dans la moelle épinière (centre nerveux), le neurone sensoriel est en contact, par l'intermédiaire d'une synapse, avec un neurone moteur, ou motoneurone. Ce dernier émet un message nerveux moteur qui quitte la moelle épinière par la racine ventrale du même nerf rachidien et parvient dans les terminaisons synaptiques du motoneurone. Par l'intermédiaire de **synapses neuromusculaires**, ces terminaisons sont en contact avec les cellules du muscle qui a été étiré. Au niveau de ces synapses, le message nerveux moteur provoque la contraction du muscle (effecteur).

La nature des messages nerveux

- La stimulation d'un neurone au-delà d'une intensité seuil entraîne une inversion rapide et transitoire du potentiel de membrane (différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule). Cette inversion, d'amplitude constante, est le **potentiel d'action**. Le message nerveux est véhiculé le long de l'axone d'un neurone sous la forme d'une série (ou train) de potentiels d'action. La fréquence de ces potentiels d'action est proportionnelle à l'intensité de stimulation du neurone.
- Au niveau d'une synapse neuromusculaire, l'arrivée d'un train de potentiels d'action entraîne la libération d'une molécule appelée **neuromédiateur** (acétylcholine) dans l'espace entre la terminaison synaptique du motoneurone et la cellule musculaire. La quantité de neuromédiateur libérée est proportionnelle à la fréquence des potentiels d'action parvenant à la terminaison synaptique. Le neuromédiateur se fixe sur des récepteurs spécifiques de la membrane de la cellule musculaire, ce qui déclenche un potentiel d'action musculaire et la contraction musculaire.

Les capacités et attitudes

- Raisonner et adopter une démarche scientifique pour mettre en évidence les éléments de l'arc réflexe **(unités 1 à 3)**
- Observer et comparer des préparations microscopiques pour comprendre l'organisation des composants de l'arc réflexe **(unités 2 et 3)**
- Recenser et organiser des informations pour comprendre la nature du message nerveux **(unité 4)**
- Interpréter des résultats expérimentaux pour comprendre l'effet de différentes substances sur le fonctionnement de la synapse neuromusculaire **(unité 5)**

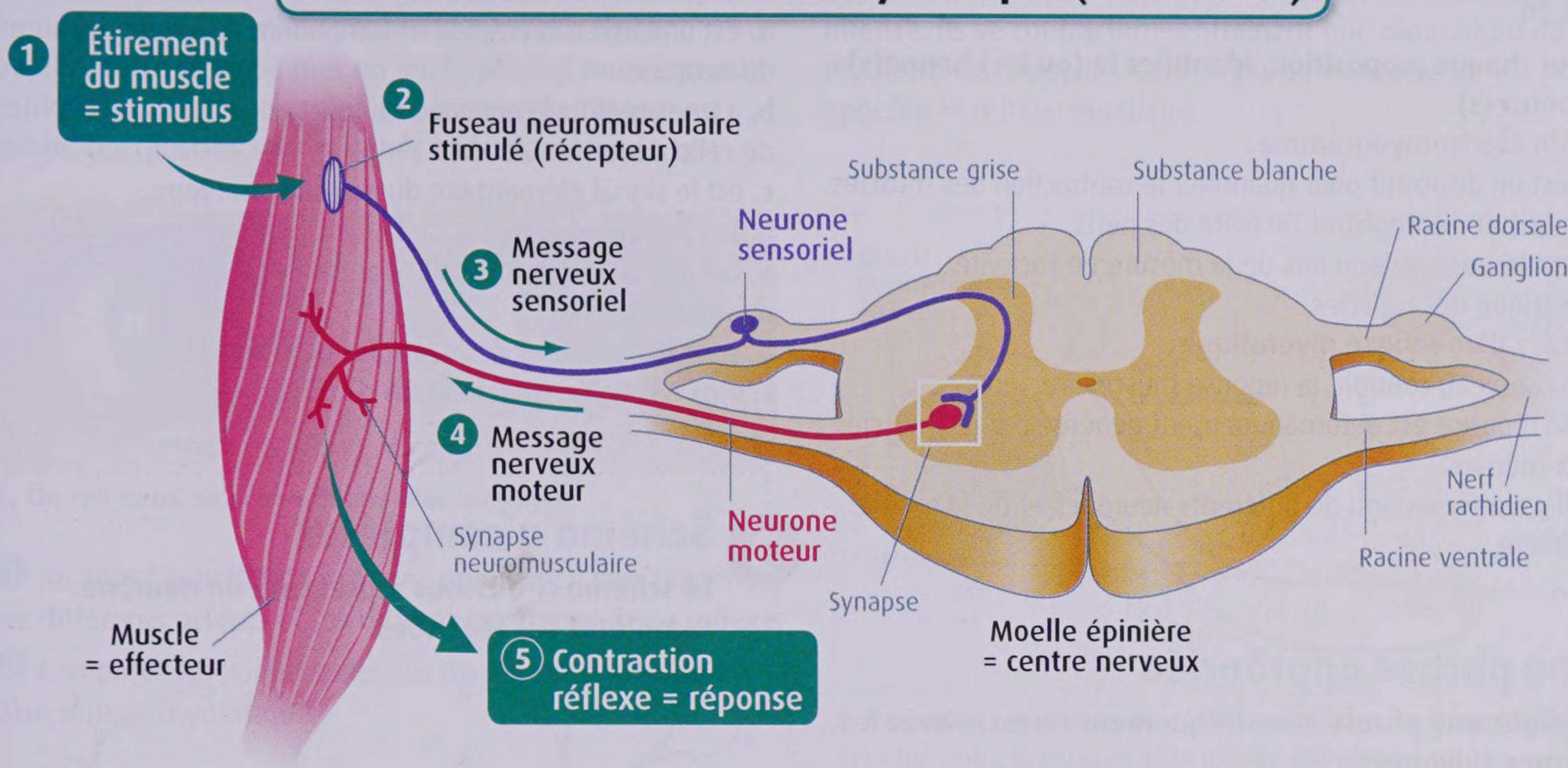
Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

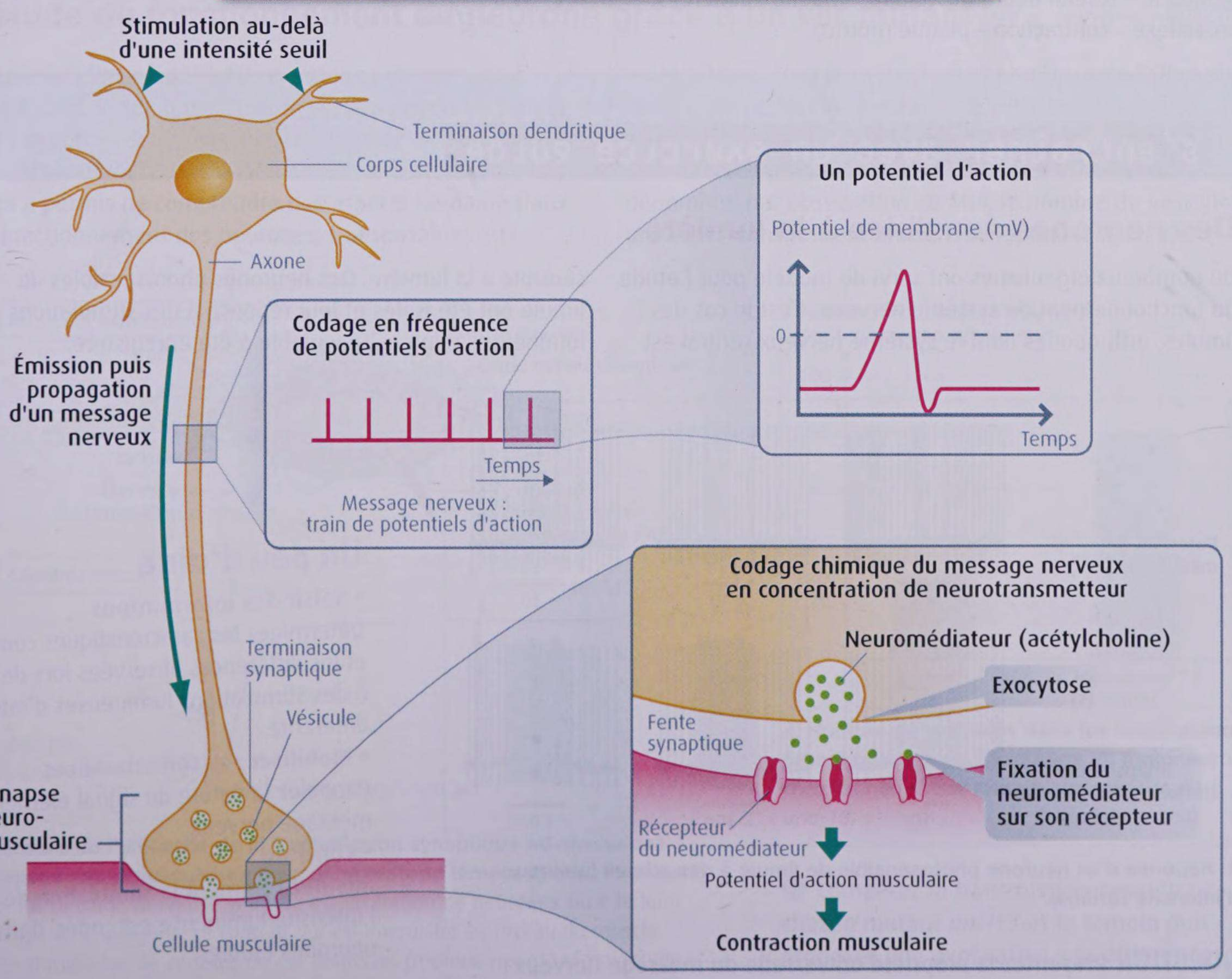
Neurone : cellule polarisée et excitable qui produit, au niveau du corps cellulaire, des messages nerveux et les véhicule le long de son axone jusqu'à ses terminaisons synaptiques.
Neuromédiateur : molécule produite par un neurone et permettant la transmission du message nerveux au niveau d'une synapse.
Potentiel d'action : inversion transitoire et d'amplitude constante du potentiel électrique entre l'extérieur et l'intérieur d'un neurone. Le message nerveux véhiculé par un axone est une succession (ou train) de potentiels d'action de fréquence donnée.
Synapse neuromusculaire : zone de contact entre une terminaison synaptique d'un motoneurone et une cellule musculaire. L'arrivée d'un message nerveux dans la terminaison synaptique provoque la contraction de la cellule musculaire.

L'essentiel par l'image

Circuit nerveux d'un réflexe myotatique (arc réflexe)



Fonctionnement du neurone et message nerveux



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. Un électromyogramme :

a. est un dispositif pour quantifier la contraction des muscles.
b. permet d'enregistrer l'activité des nerfs.
c. est le tracé obtenu lors de la mesure de l'activité électrique des muscles.

2. Lors d'un réflexe myotatique :

a. le cerveau contrôle la réponse musculaire.
b. la réponse est automatiquement générée par les muscles eux-mêmes.
c. il y a intervention de différents neurones et de la moelle épinière.

3. Le potentiel d'action :

a. est une inversion rapide et temporaire de la polarité du neurone.
b. a une amplitude qui varie en fonction de celle de la stimulation.
c. est le signal élémentaire du message nerveux.

4. Les neuromédiateurs de la synapse neuromusculaire :

a. ont des récepteurs spécifiques sur la membrane du motoneurone.
b. sont stockés dans des vésicules de sécrétion.
c. sont à l'origine de potentiels d'action.

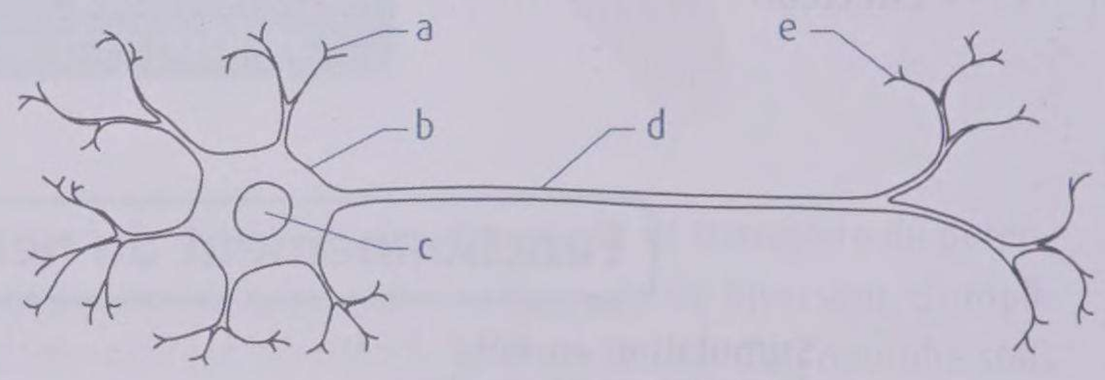
2 Une phrase appropriée

Rédigez une phrase scientifiquement correcte avec les termes suivants :

a. Concentration – message nerveux – fréquence – motoneurones – neuromédiateur – plaque motrice.
b. Muscle – fuseau neuromusculaire – moelle épinière – arc réflexe – contraction – plaque motrice.

3 Schéma à compléter

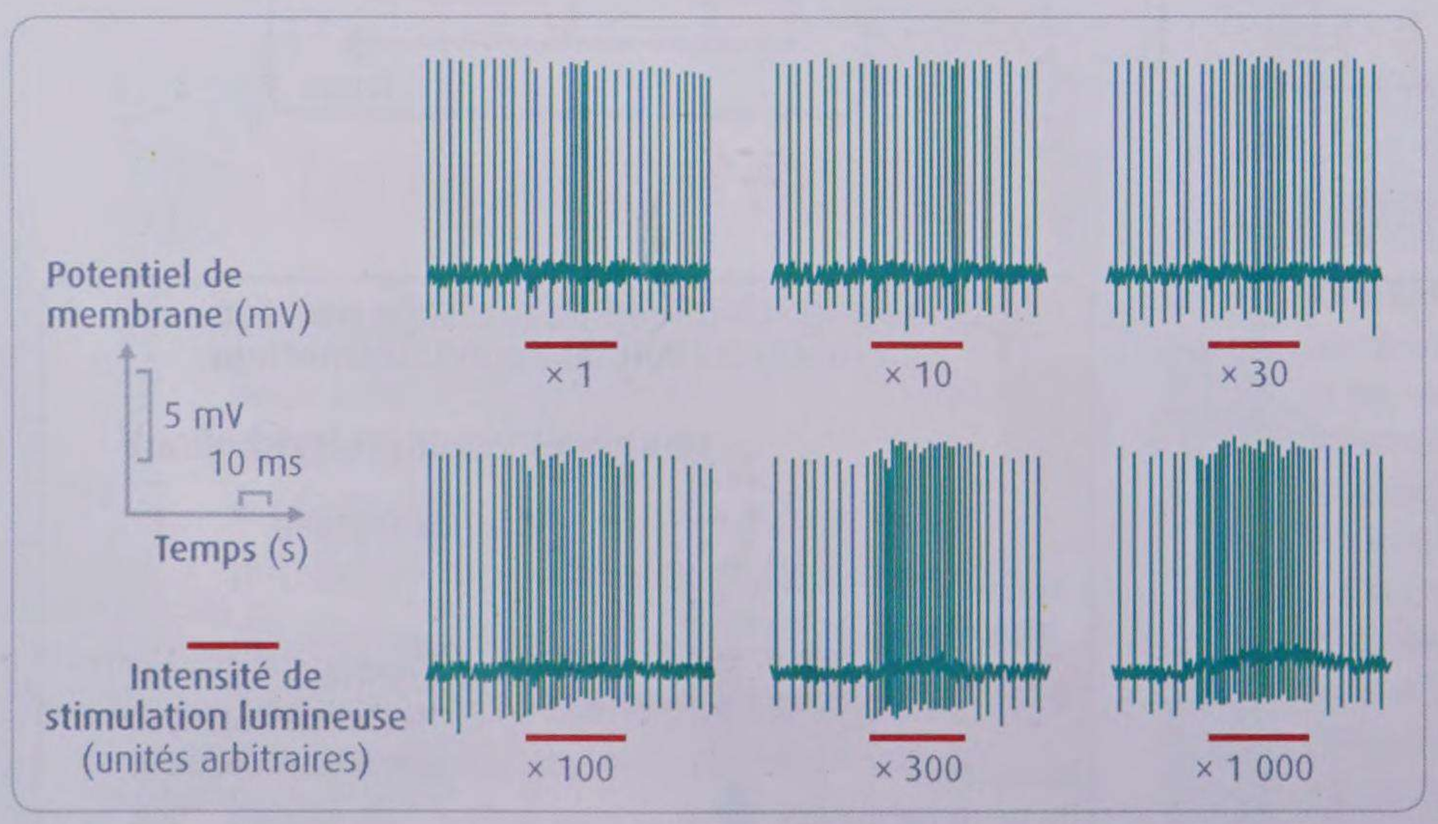
Le schéma ci-dessous représente un neurone. Complétez ses légendes.



s'entraîner avec un exercice guidé

4 Des neurones sensibles à la lumière

De nombreux organismes ont servi de modèle pour l'étude du fonctionnement du système nerveux. C'est le cas des limules, arthropodes dont le système nerveux central est sensible à la lumière. Des neurones photosensibles de limule ont été isolés et leur réponse à des stimulations lumineuses d'intensité variable a été enregistrée.



1. Réponse d'un neurone photosensible de limule à des stimuli lumineux d'intensité variable.

QUESTION Présentez la propriété universelle du message nerveux illustrée par cette expérience.

Un peu d'aide

• Saisir des informations
Déterminez les caractéristiques communes et les différences observées lors de réponses à des stimulations lumineuses d'intensité différente.

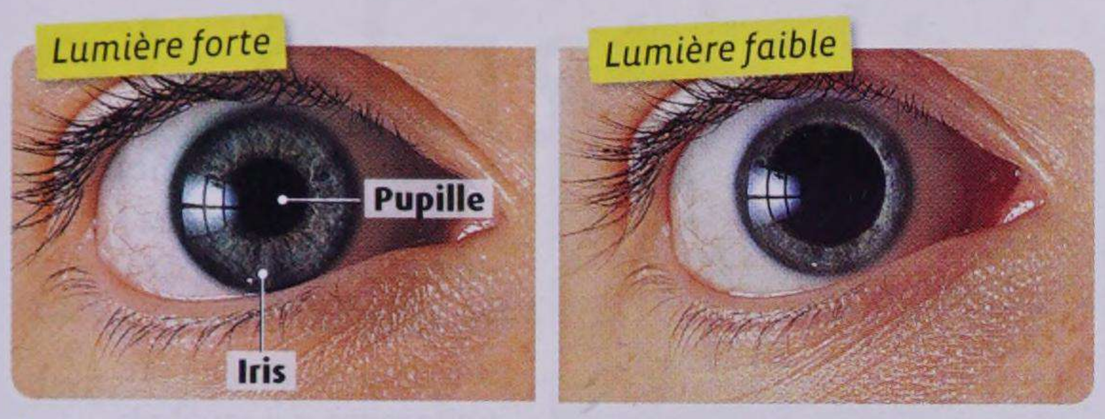
• Mobiliser ses connaissances
Rappelez la nature du signal élémentaire du message nerveux.

• Conclure
Montrez comment la stimulation de l'intensité lumineuse est codée dans les neurones étudiés.

5 Le réflexe pupillaire

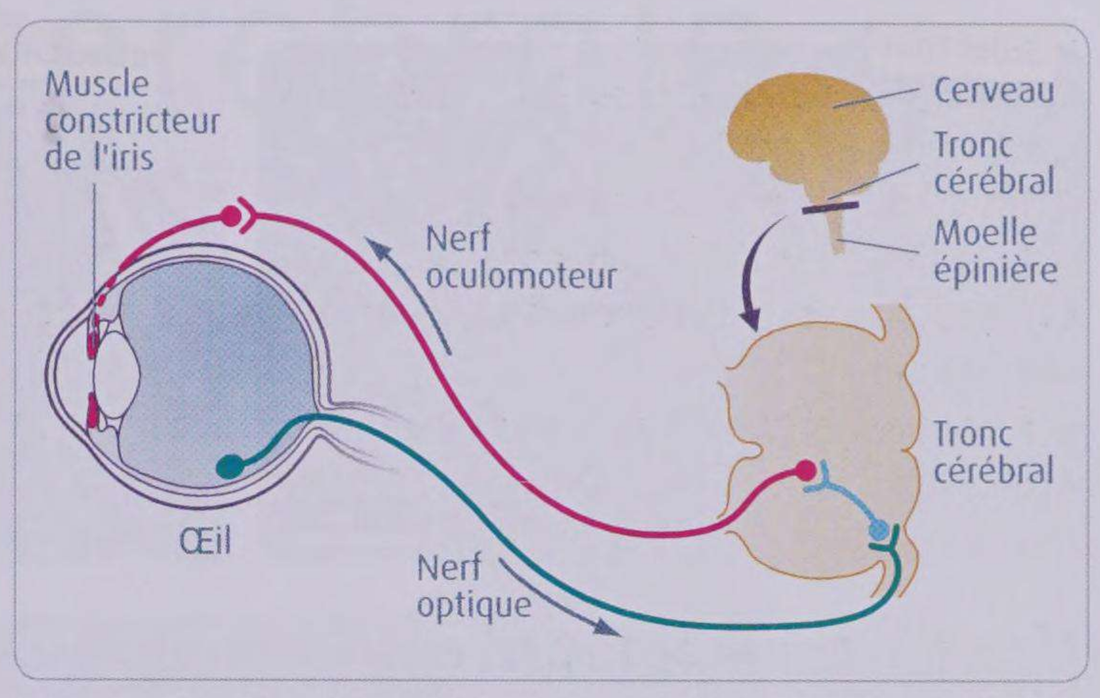
Utiliser ses connaissances

Les yeux répondent à un changement d'intensité lumineuse par une modification du diamètre de la pupille. Cette réponse met en jeu la plus ou moins grande contraction des muscles de l'iris. Lorsque la lumière est faible, ces muscles sont relâchés et le diamètre de la pupille est maximal, alors qu'en présence de lumière intense, ils se contractent, entraînant une diminution du diamètre de la pupille. Cette réponse inconsciente est appelée le réflexe pupillaire.



1. Un œil dans deux conditions d'éclairement.

1. Justifiez l'appellation « réflexe pupillaire » puis présentez les différents acteurs et les différentes étapes de ce réflexe.
2. Comparez les voies nerveuses du réflexe pupillaire et d'un réflexe myotatique.

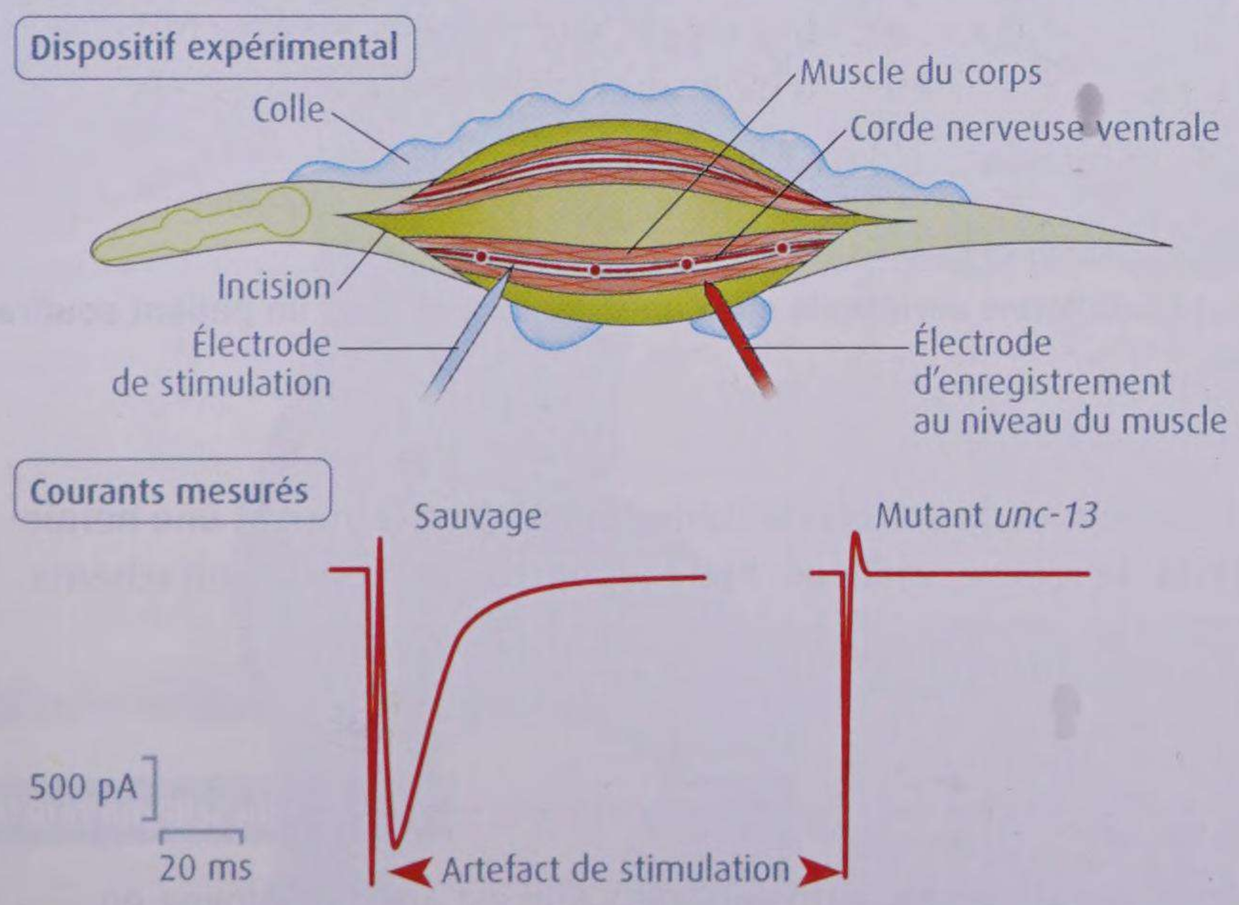


2. Les voies nerveuses du réflexe pupillaire. Le tronc cérébral est situé entre le cerveau et la moelle épinière.

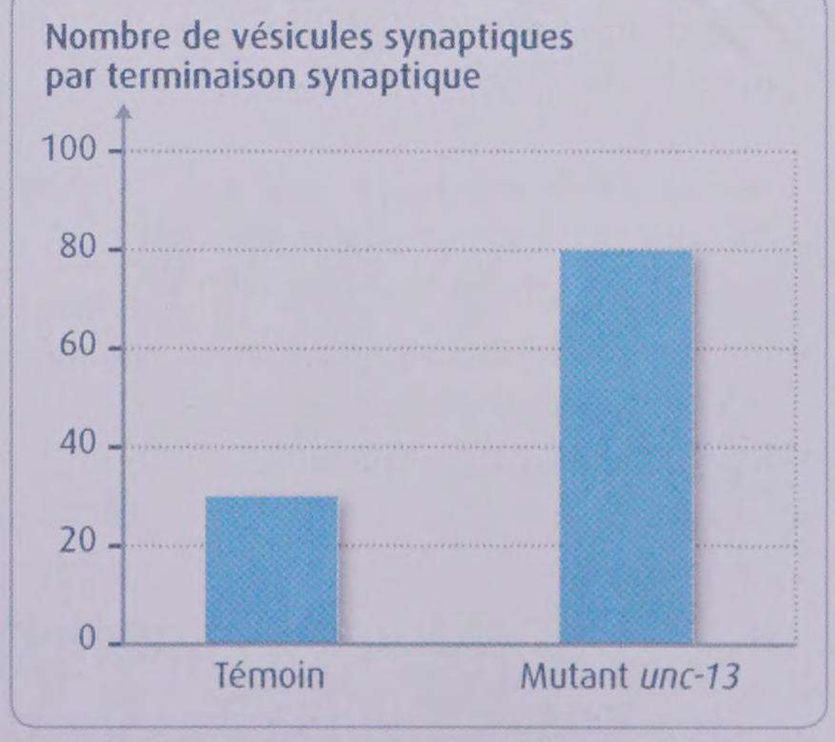
6 L'étude du fonctionnement du neurone grâce à un ver mutant

Raisonner

Caenorhabditis elegans est un ver long d'1 mm et vivant dans le sol. Il possède un système nerveux simple (302 neurones seulement) et l'on dispose de nombreuses souches mutantes. La caractérisation de certaines d'entre elles a permis de comprendre des aspects fondamentaux du fonctionnement des neurones, transposables aux mammifères. Chez le mutant *unc-13*, on mesure l'efficacité de la transmission du message nerveux au niveau des synapses neuromusculaires (transmission synaptique) après stimulation des motoneurones (doc. 1). Parallèlement, on dénombre, par observation au MET, le nombre de vésicules présentes dans les terminaisons synaptiques (doc. 2).



1. Mesure de l'efficacité de la transmission synaptique au niveau des synapses neuromusculaires chez un nématode témoin et chez le mutant *unc-13*. La corde nerveuse ventrale est un cordon de neurones situé le long du corps de *C. elegans*. Le courant qui est enregistré au niveau du muscle après stimulation de certains de ces neurones (motoneurones) témoigne de mouvements d'ions associés au potentiel d'action musculaire.



2. Nombre de vésicules dans les terminaisons synaptiques après stimulation du motoneurone chez un nématode témoin et chez le mutant *unc-13*.

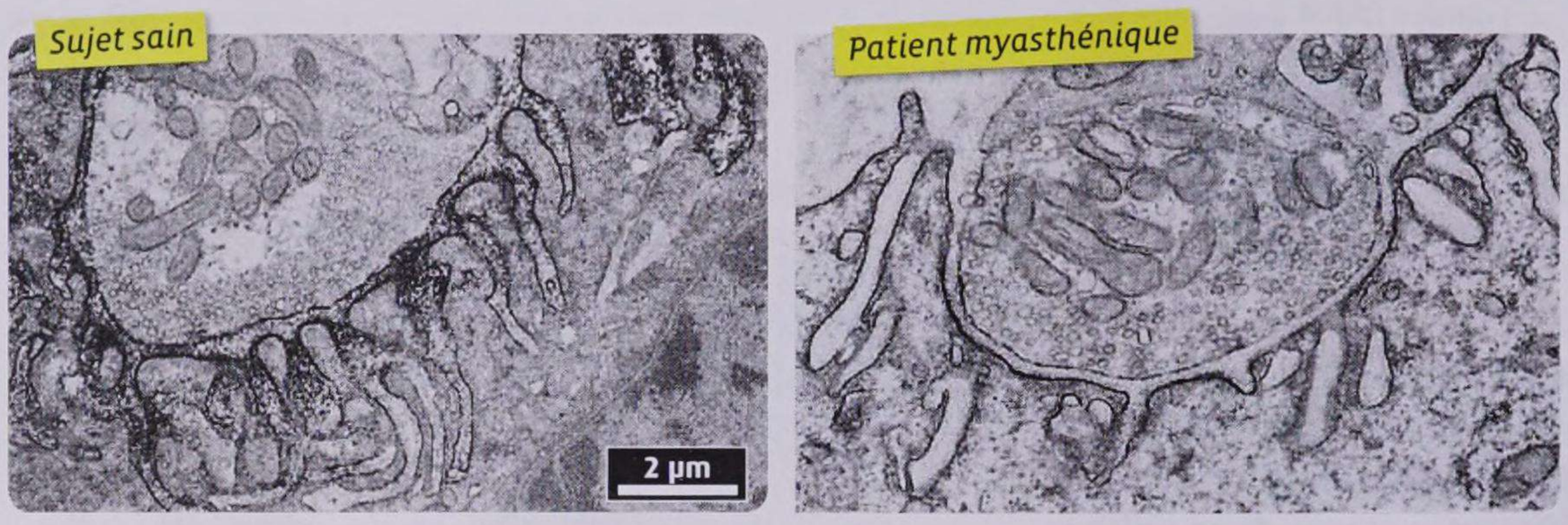
- Comparez la transmission synaptique chez le mutant *unc-13* et le témoin puis proposez une explication à la différence observée.

Appliquer ses connaissances

7 Une maladie neuromusculaire : la myasthénie

Observer et raisonner

La myasthénie est une affection grave, mais généralement non mortelle, dont on ne connait pas encore les causes précises. Ses symptômes les plus courants sont une vision double (diplopie), une chute des paupières (ptosis) et une fatigue musculaire. Des synapses neuromusculaires de patients souffrant de myasthénie et de sujets sains ont été comparées.



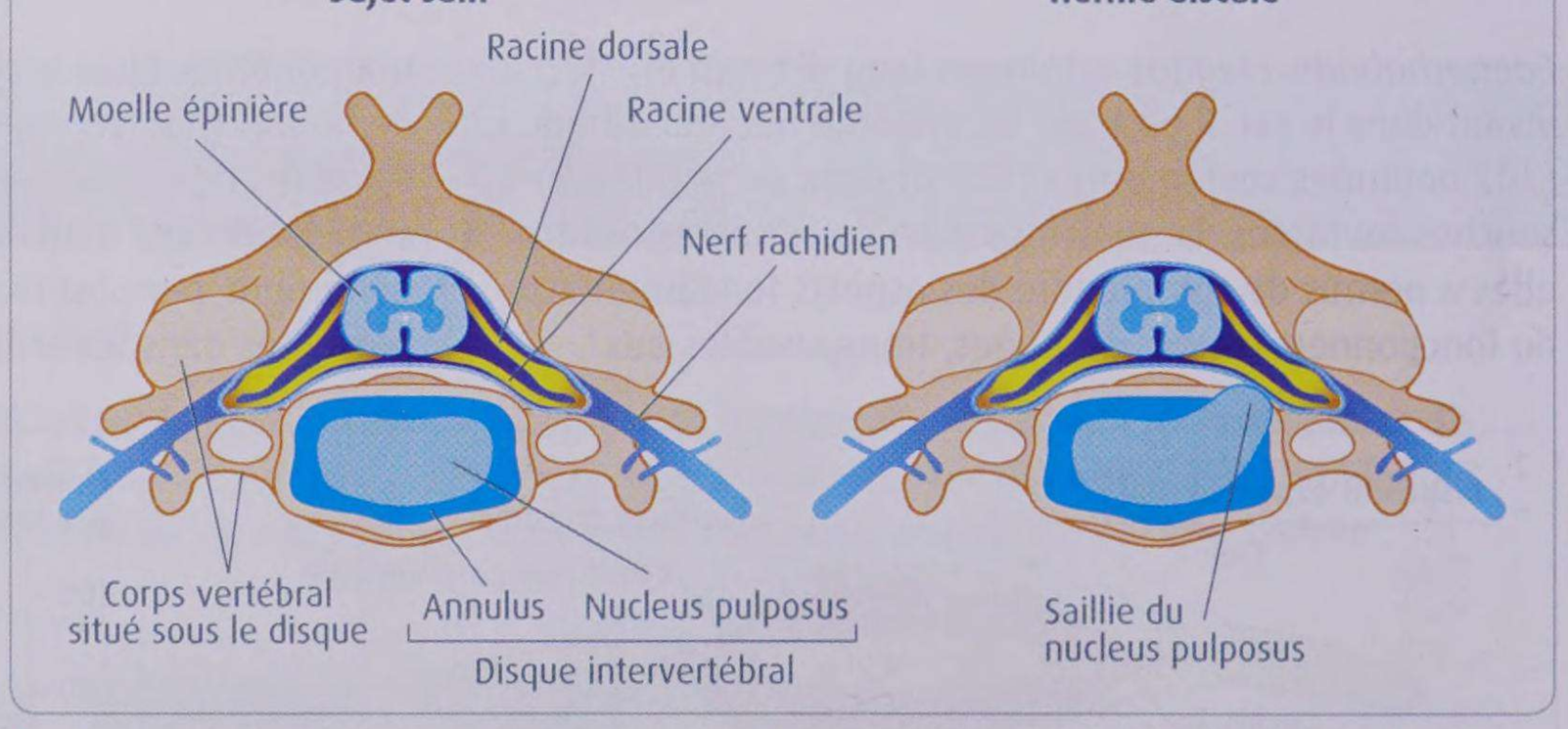
1. Une synapse neuromusculaire chez un sujet sain et chez un patient atteint de myasthénie (au MET). Les coupes ont subi un traitement qui révèle la présence de récepteurs à l'acétylcholine sous la forme d'un marquage noir.

● Exploitez les informations de l'énoncé et du document afin de proposer une hypothèse expliquant les symptômes associés à la myasthénie.

8 La hernie discale

Raisonner et construire un schéma

L'axe de la colonne vertébrale est constitué d'une alternance de pièces osseuses pleines (les corps vertébraux) et de disques intervertébraux. Chaque disque comporte un anneau de cartilage (annulus) au centre duquel se trouve un noyau mou et déformable (nucleus pulposus). À la suite d'un faux mouvement ou d'un travail musculaire très intense, l'annulus peut rompre et le nucleus pulposus faire alors saille (doc. 1) : c'est une hernie discale. Cette affection est très douloureuse et, dans certains cas, on observe une perturbation du réflexe achilléen allant jusqu'à une absence complète de réponse musculaire pendant le test.



1. Vue en coupe de la colonne vertébrale chez un sujet sain et chez un patient souffrant de hernie discale.

● À l'aide du document et de vos connaissances, expliquez comment une hernie discale peut affecter le réflexe achilléen. Votre réponse s'appuiera sur un schéma fonctionnel.

9 Le mystère de la toxine botulique

Réaliser un schéma fonctionnel

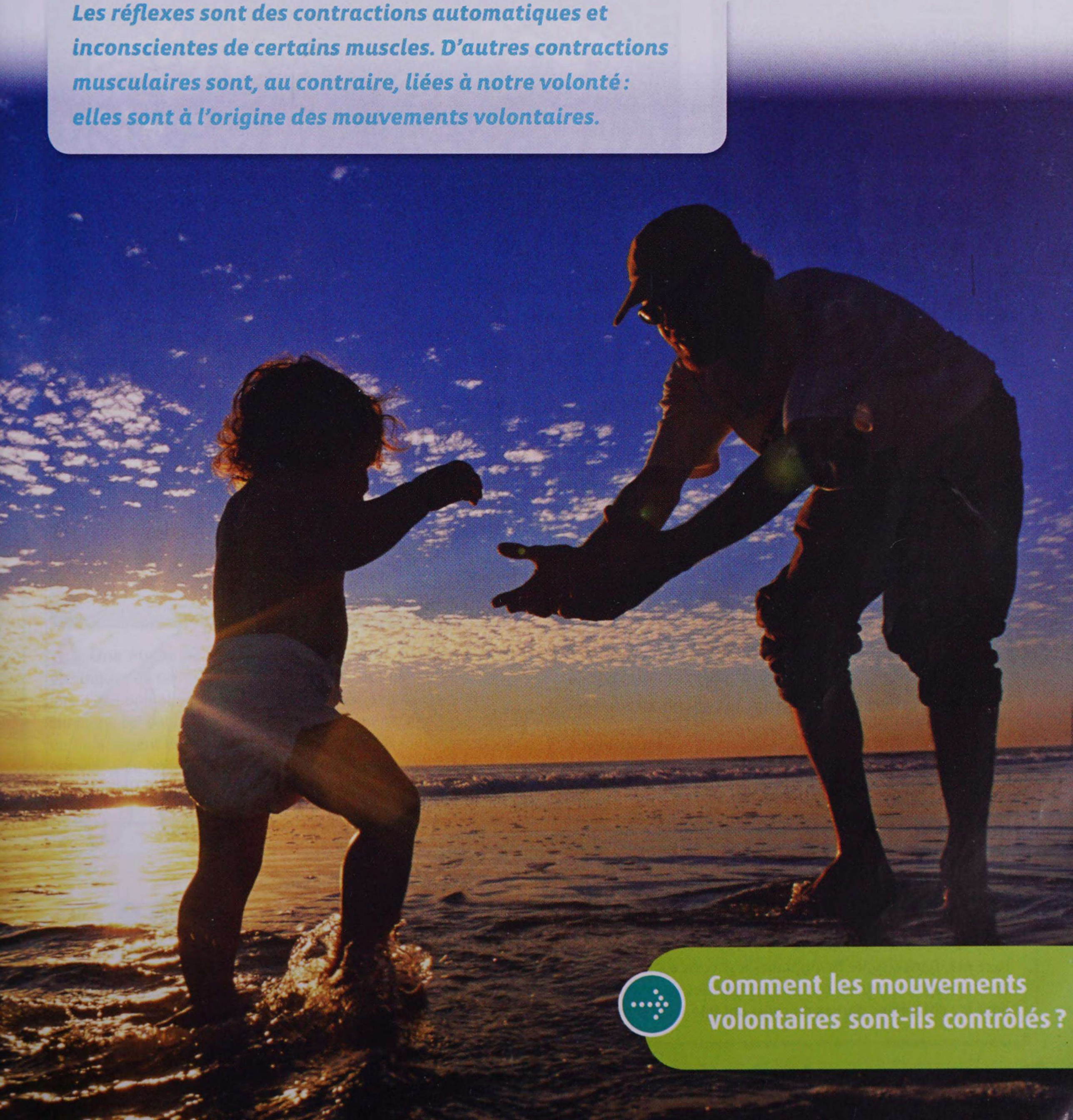
La toxine botulique est produite par différentes bactéries du genre *Clostridium*. Elle peut entraîner la mort par paralysie. À petite dose, la toxine botulique est utilisée par les neurologues pour soigner les mouvements anormaux (troubles dystoniques) et l'excès de tonus musculaire (hypertonie). Elle est aussi employée en médecine esthétique pour combattre les rides. Au niveau d'une synapse neuromusculaire, cette toxine empêche la libération d'acétylcholine.

● À l'aide d'un schéma fonctionnel, expliquez les différents effets de la toxine botulique.

CHAPITRE 2

Motricité, volonté et plasticité cérébrale

Les réflexes sont des contractions automatiques et inconscientes de certains muscles. D'autres contractions musculaires sont, au contraire, liées à notre volonté : elles sont à l'origine des mouvements volontaires.



Comment les mouvements volontaires sont-ils contrôlés ?

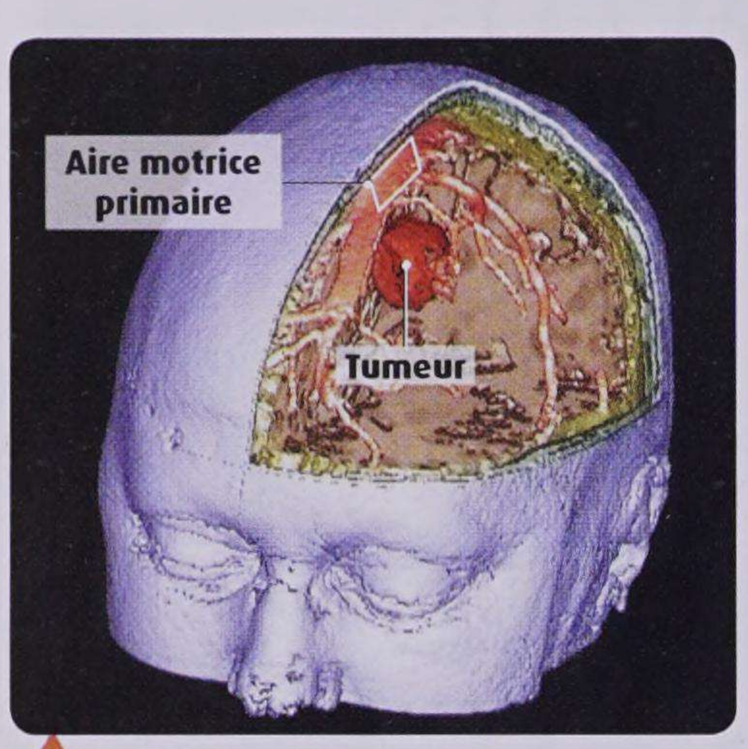
UNITÉ 1

La commande volontaire du mouvement

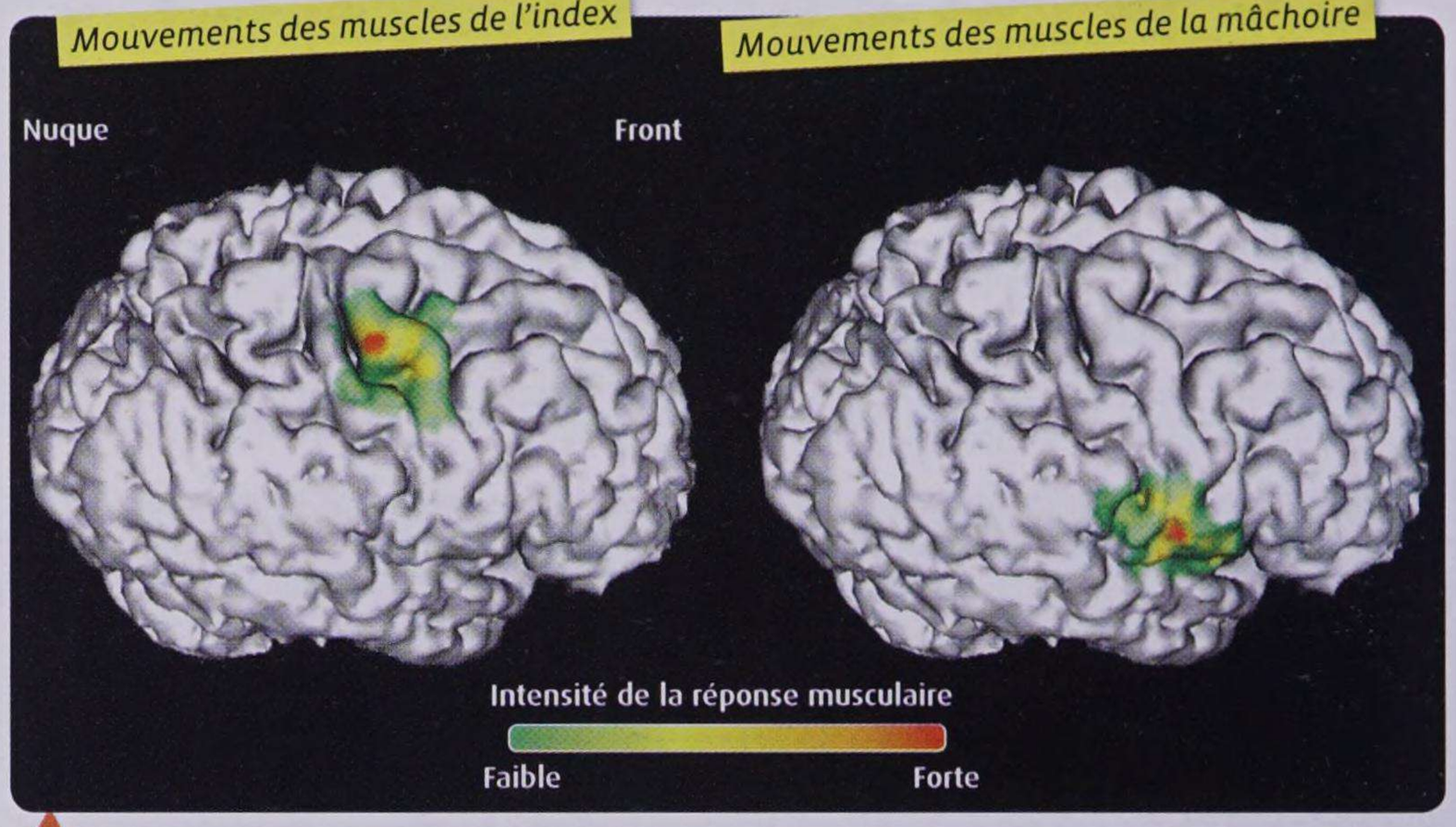
Un réflexe myotatique ne fait pas intervenir le cerveau. En revanche, la commande de tous les mouvements volontaires provient du notre cerveau.

Quelles sont les régions du cerveau qui participent au contrôle des mouvements volontaires ?

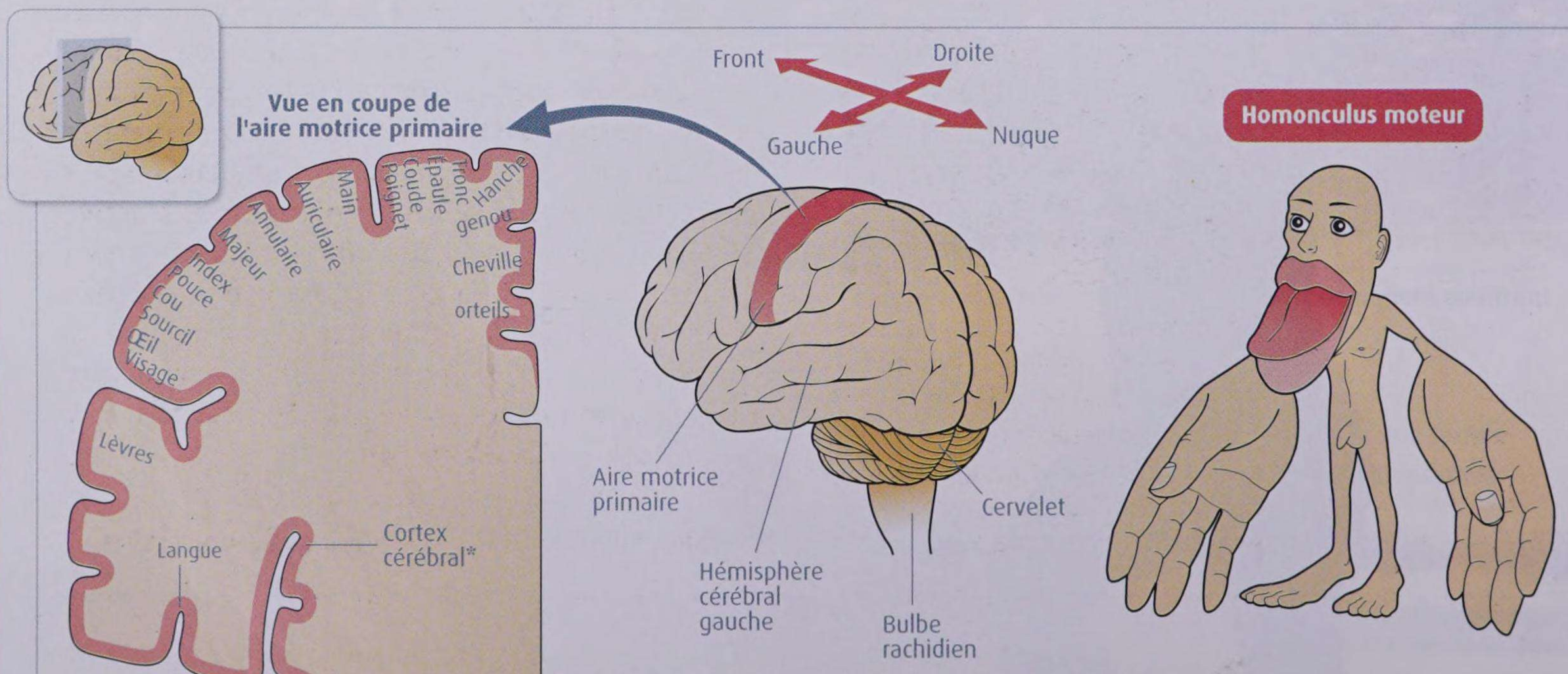
L'aire motrice primaire et son organisation



1 IRM 3D d'un patient présentant une tumeur cérébrale. La tumeur perturbe le fonctionnement d'une région du cortex appelée aire motrice primaire (ou aire M1, voir doc. 3). Le patient présente, entre autres, une difficulté à réaliser des mouvements volontaires. En revanche, les réflexes myotatiques se manifestent normalement.

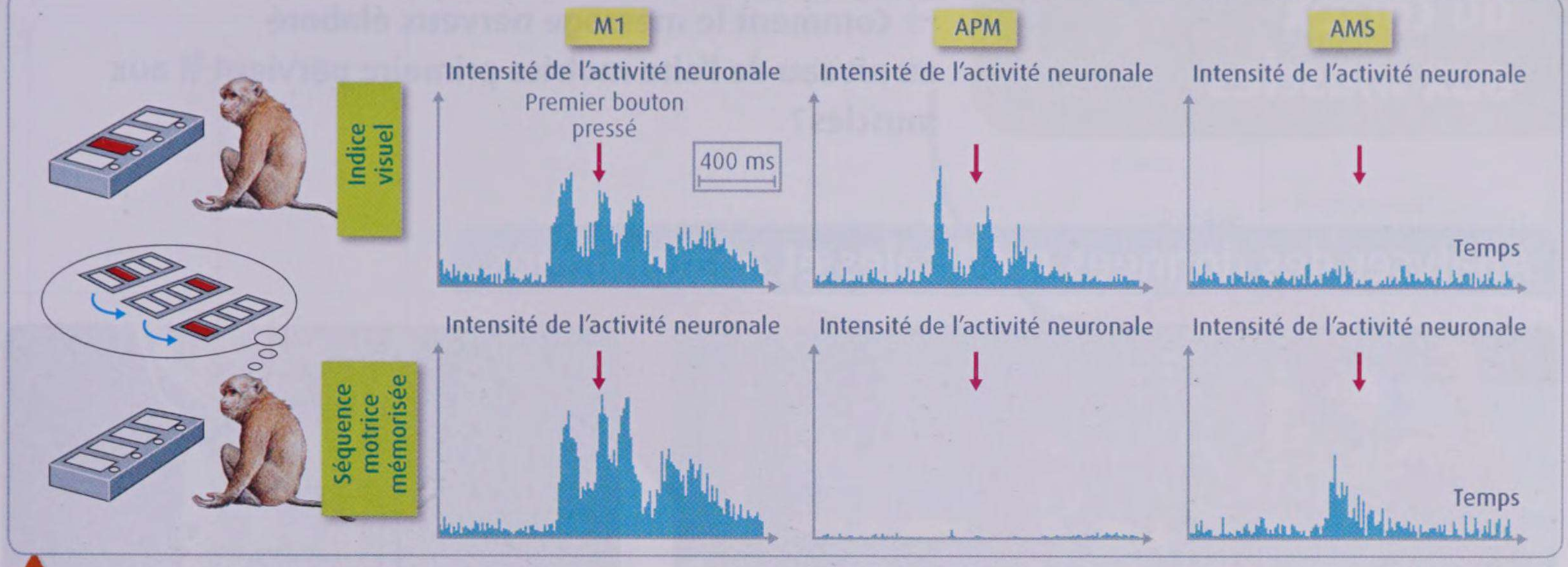


2 Une expérience de stimulation magnétique transcranienne (SMT). La SMT consiste à appliquer, au niveau d'une zone précise du crâne, une impulsion électromagnétique qui excite les neurones de la région du cortex sous-jacente. On suit alors la réponse de différents muscles (contraction). L'image obtenue est une carte des zones dont l'activation induit la contraction d'un muscle donné. Ces zones sont situées dans l'aire motrice primaire.

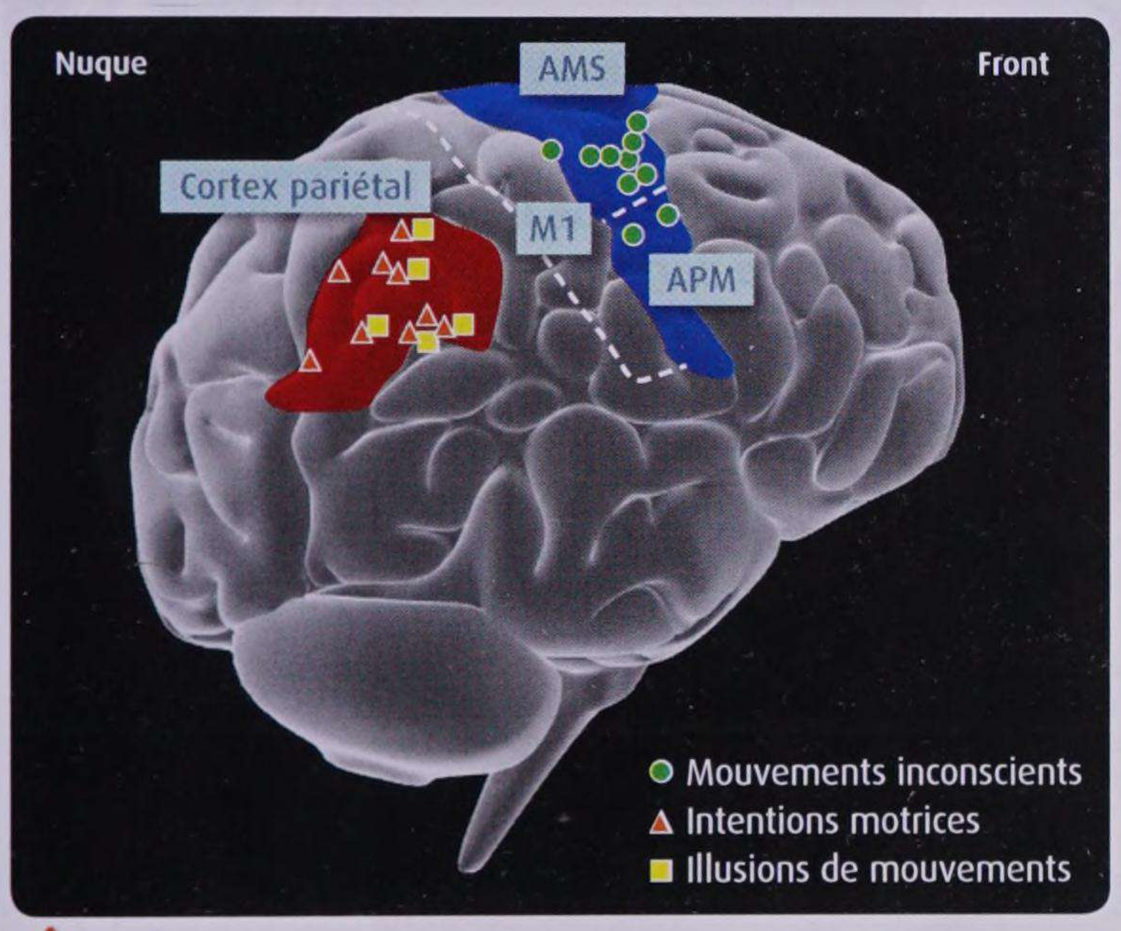


3 L'aire motrice primaire et l'homonculus moteur. Grâce à de nombreuses études, les zones de l'aire motrice primaire (M1) dont l'activation induit la contraction d'un muscle donné du corps ont été déterminées. On a ainsi établi une cartographie de l'aire M1. Dans chaque hémisphère, les zones contrôlant les mouvements des différentes régions du corps sont adjacentes. L'aire M1 de l'hémisphère gauche contrôle les muscles de la partie droite du corps et réciproquement. L'homonculus moteur figure un humain dont les différentes parties du corps ont une taille proportionnelle à la surface des zones de l'aire M1 qui en contrôlent la motricité.

D'autres aires corticales impliquées



4 Une étude du rôle de deux aires cérébrales voisines de l'aire motrice primaire. Il est demandé à des singes de presser trois boutons dans un ordre soit indiqué par des signaux lumineux (indice visuel), soit qu'ils ont précédemment mémorisé (séquence mémorisée). On étudie dans le même temps l'activité de l'aire M1, de l'aire prémotrice (APM) et de l'aire motrice supplémentaire (AMS) (voir doc. 5). Quand l'APM ou AMS sont lésées, l'animal est incapable d'effectuer certains types de mouvements volontaires. Par exemple, il ne peut pas effectuer un mouvement s'il doit choisir entre différents mouvements possibles. En revanche, s'il n'y a pas de choix à faire, le mouvement reste possible.



5 Une étude du rôle du cortex pariétal. Des stimulations électriques du cortex sont pratiquées chez des patients éveillés lors d'une opération sous anesthésie locale. Selon la région stimulée, les patients réalisent des mouvements inconscients ou bien restent immobiles tout en indiquant au chirurgien qu'ils ont envie de bouger une partie du corps (intention motrice) ou qu'ils ont l'impression d'avoir réalisé un mouvement.

De façon très simplifiée, on peut dire que la réalisation des mouvements volontaires implique la collaboration entre trois types d'aires corticales connectées entre elles. Certaines aires sont impliquées dans l'intention du mouvement, c'est-à-dire dans la décision de réaliser tel ou tel mouvement. D'autres aires sont impliquées dans la sélection des mouvements qui vont être nécessaires pour réaliser une séquence motrice donnée (contracter certains muscles pour appuyer sur un bouton par exemple) correctement et au bon moment : elles préparent en quelque sorte le mouvement. Cette préparation peut s'effectuer soit sur la base d'informations externes (« *je dois appuyer sur le bouton dès que cette lumière s'allume* »), soit sur la base d'informations internes (« *je me souviens que je dois maintenant appuyer sur ce bouton* »). Enfin, certaines zones commandent la contraction de tel ou tel muscle de sorte que la séquence motrice est réalisée.

6 Des collaborations entre les aires corticales.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Présentez l'organisation fonctionnelle de l'aire motrice primaire.

2 **DOC. 3 À 6.** En vous appuyant sur le doc. 6, précisez les fonctions des aires corticales présentées doc. 3 à 5.

3 **EN CONCLUSION.** Réalisez un schéma fonctionnel présentant le rôle du cortex cérébral dans l'élaboration de la commande volontaire du mouvement.

UNITÉ 2

Les voies motrices : du cortex aux muscles

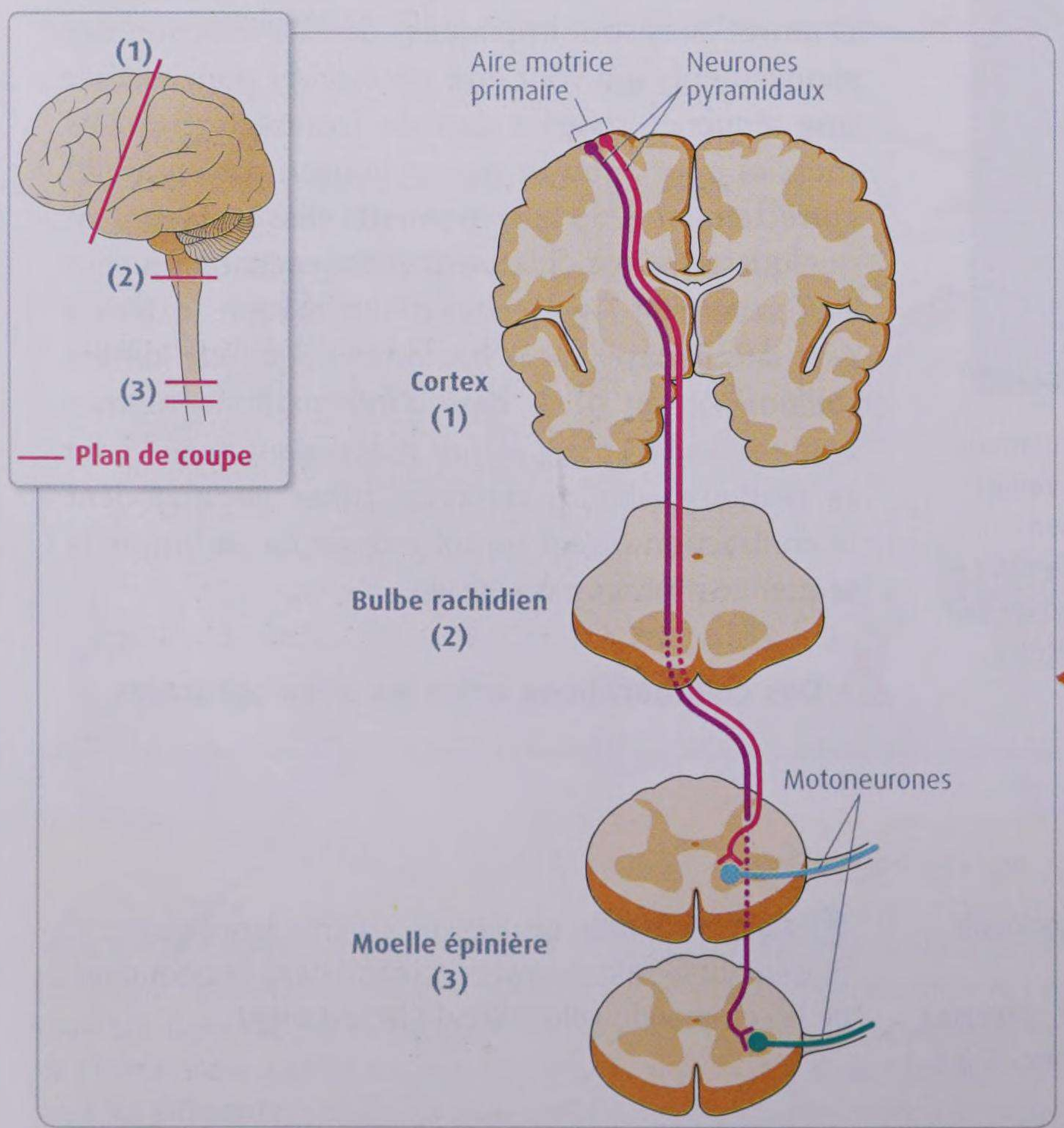
Le message nerveux qui commande les mouvements volontaires est élaboré au niveau d'aires spécialisées du cortex cérébral, dont l'aire motrice primaire. Ces aires constituent le cortex moteur.

Comment le message nerveux élaboré au niveau de l'aire motrice primaire parvient-il aux muscles ?

Analyser des données médicales et anatomiques

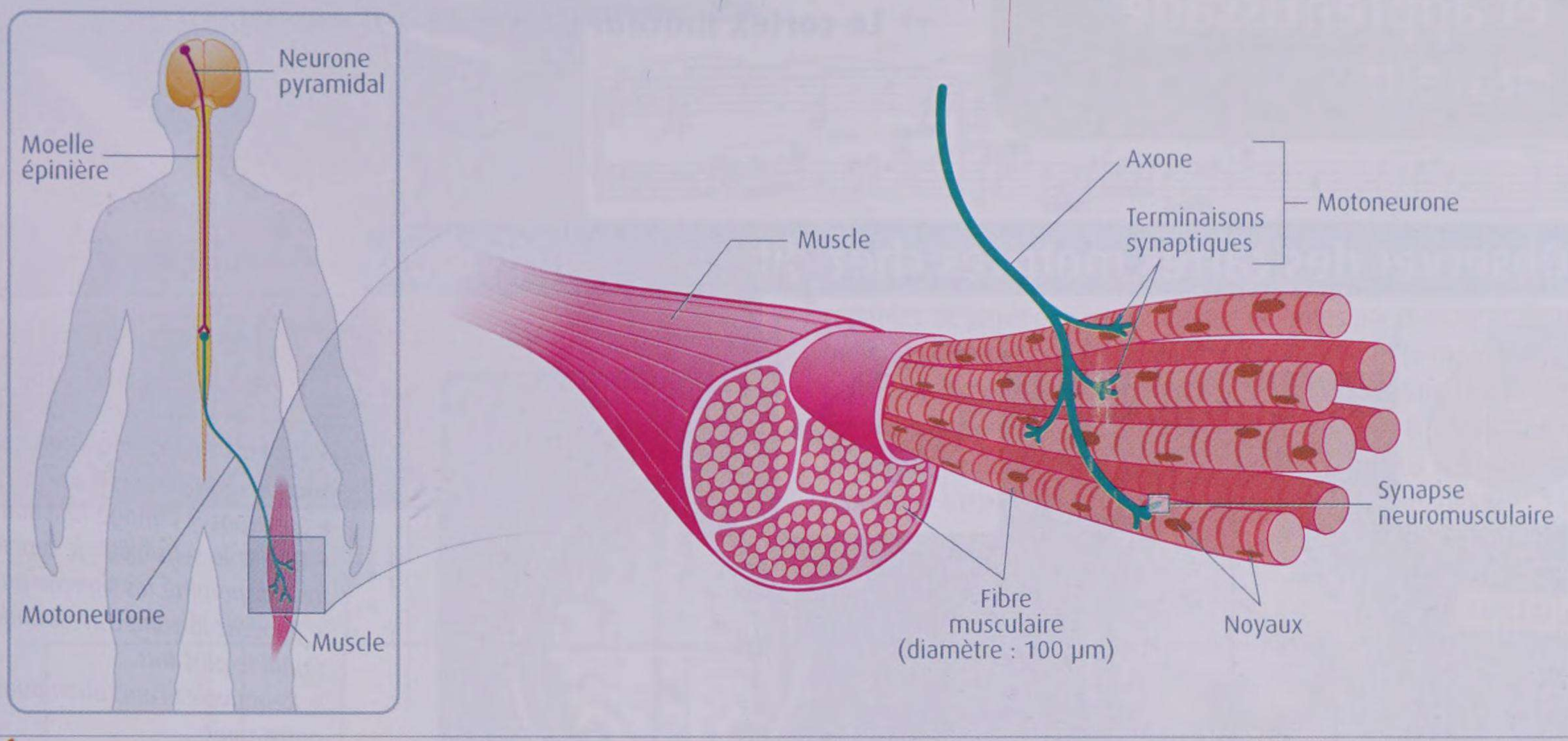
1 Le sportif Emeric Martin (à gauche). Suite à un accident de voiture ayant occasionné une lésion de la moelle épinière, ce joueur de tennis de table est devenu paraplégique : il ne peut plus bouger les jambes.

2 Une lésion de la moelle épinière observée par IRM. Ce type de lésion est la conséquence de traumatismes importants de la colonne vertébrale. Si la lésion est localisée au niveau cervical (voir doc. 4 p. 329), les patients sont tétraplégiques (leurs jambes et leur bras sont paralysés). Si elle est localisée plus bas, les patients sont paraplégiques (leurs jambes sont paralysées, mais pas leurs bras).

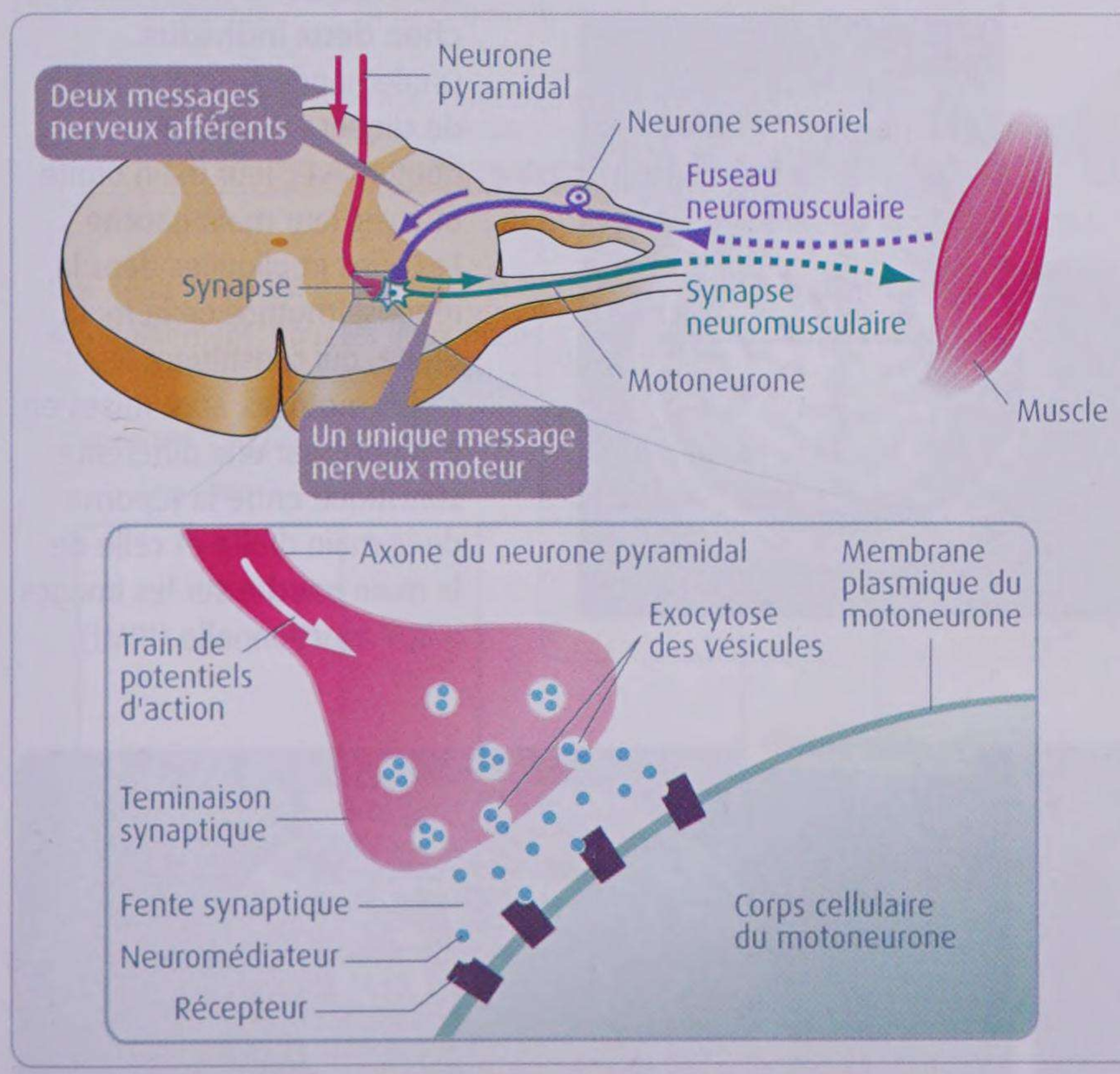


3 Du cortex aux motoneurones : la voie pyramidale. Les neurones de l'aire motrice primaire, ou neurones pyramidaux, envoient leurs axones vers les structures inférieures du cerveau, le bulbe rachidien puis la moelle épinière. Au niveau du bulbe, les axones issus des hémisphères gauche et droit se croisent, puis ils descendent le long de la moelle épinière : c'est la voie pyramidale. À différents niveaux de la moelle, ces axones sont en contact avec les motoneurones au niveau de synapses (voir doc. 5).

Comprendre le contrôle d'un muscle par les motoneurones



4 L'innervation des muscles par les motoneurones. Une même fibre musculaire (cellule musculaire) n'est innervée que par un seul motoneurone. Un même motoneurone innerve plusieurs fibres d'un même muscle.



5 Les synapses et le rôle intégrateur des motoneurones. Par l'intermédiaire de synapses, un motoneurone est en contact avec les terminaisons synaptiques d'un neurone pyramidal et avec celles de neurones sensoriels (impliqués dans les réflexes myotatiques par exemple). L'arrivée d'un train de potentiels d'action dans la terminaison synaptique d'un neurone pyramidal (ou d'un neurone sensoriel) provoque l'exocytose des vésicules qui s'y trouvent et la libération dans la fente synaptique des molécules de neuromédiateur qu'elles contiennent. Leur fixation sur des récepteurs situés sur la membrane plasmique du motoneurone provoque des modifications des propriétés électriques de cette membrane. Les modifications résultant du fonctionnement des différentes synapses sont « additionnées » par le motoneurone, qui émet alors, au niveau de l'axone, un unique message nerveux. Le motoneurone a ainsi intégré les messages nerveux qu'il a reçus.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 À 3.** Expliquez les effets paralysants des lésions de la moelle épinière.

2 **DOC. 4 À 6.** Décrivez la séquence des événements qui conduisent à l'élaboration d'un message nerveux par un motoneurone.

3 **EN CONCLUSION.** Récapitulez sous la forme d'un schéma fonctionnel les événements qui vont de l'élaboration d'un message nerveux dans l'aire motrice primaire à la contraction volontaire d'un muscle.

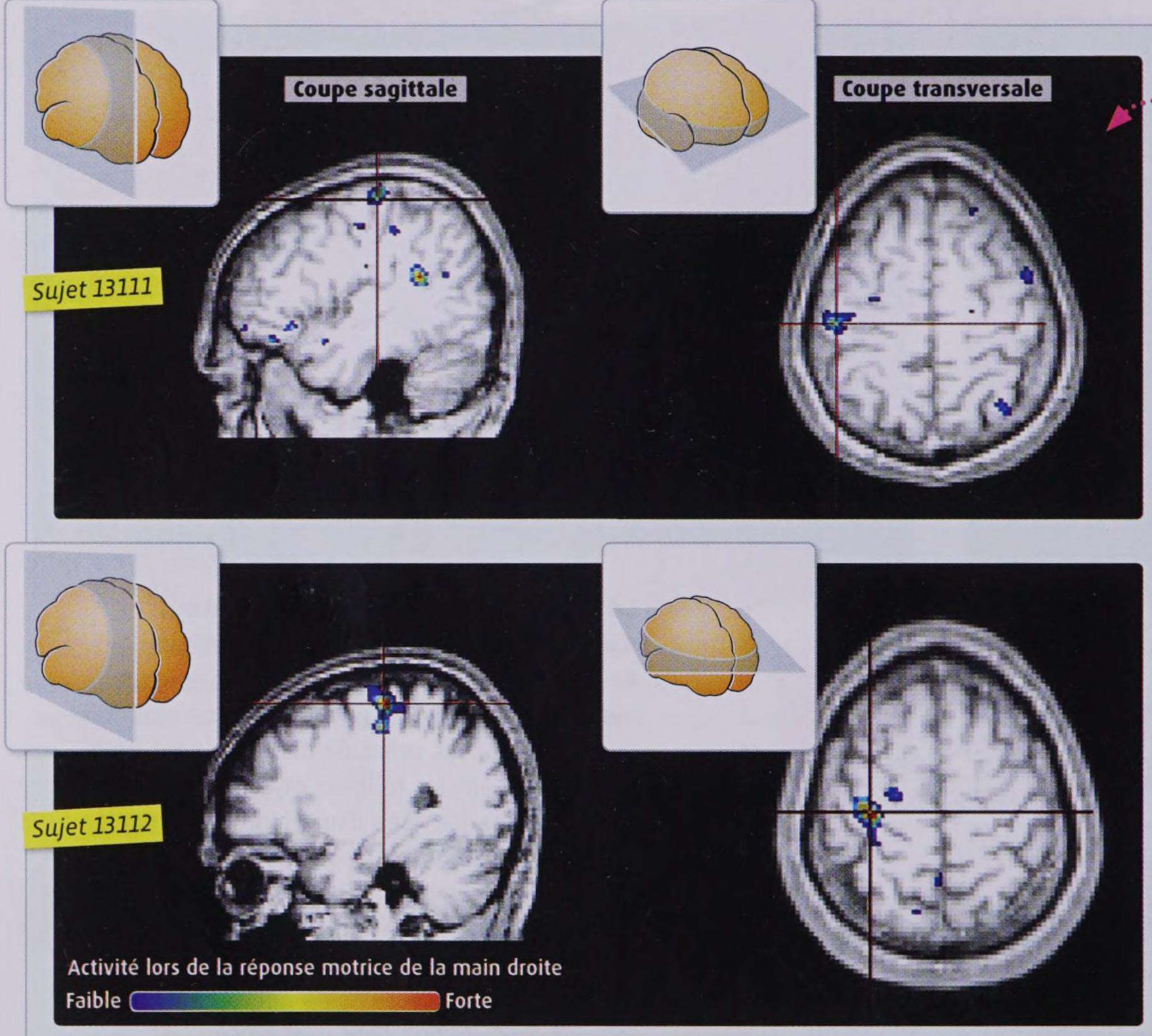
UNITÉ 3

Plasticité cérébrale et apprentissage moteur

Les connexions qu'établissent entre eux certains neurones du cortex cérébral d'un individu peuvent se modifier en fonction des expériences qu'il a vécues : c'est la plasticité cérébrale.

Le cortex moteur présente-t-il une plasticité ?

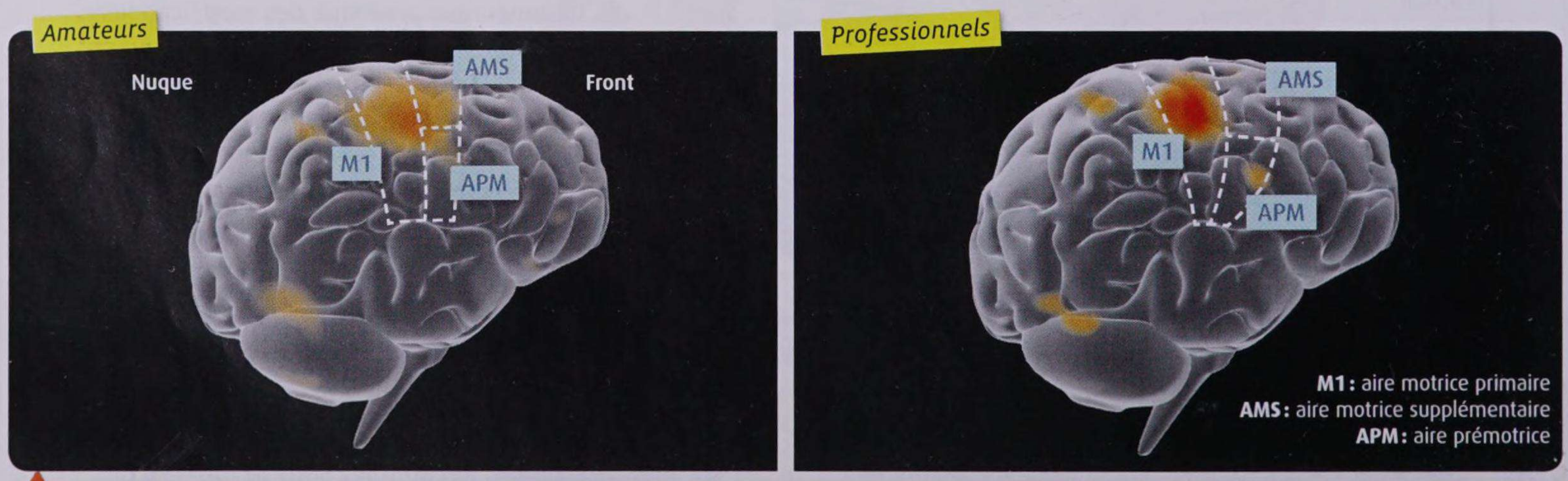
Observer des cartes motrices chez différents individus



1 Une étude de la carte motrice de la main droite chez deux individus.
On demande à deux sujets de cliquer trois fois sur un bouton avec leur main droite ou avec leur main gauche. Les aires impliquées dans la réponse motrice de la main droite, qui constituent les cartes motrices, sont mises en évidence par une différence statistique entre la réponse de la main droite et celle de la main gauche sur les images d'IRM fonctionnelle (IRMf).

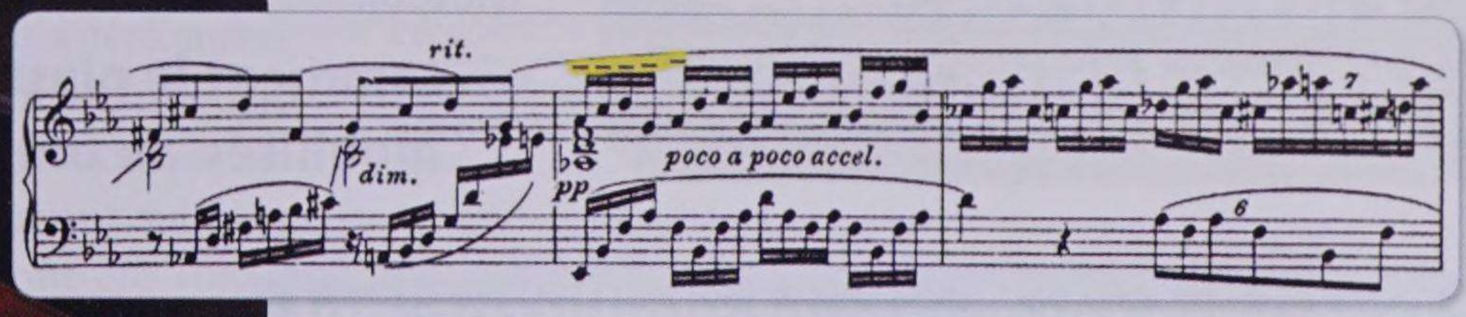
TP J'UTILISE EDUANATOMIST

▸ Visualisez l'image anatomique pour un premier sujet.
▸ Superposez l'image fonctionnelle.
▸ Réglez la sensibilité de manière à faire disparaître les signaux parasites.
▸ Repérez la zone correspondant au signal le plus fort.
▸ Renouvelez l'opération pour un autre sujet.



2 Analyse par IRMf de l'activité du cortex cérébral chez des violonistes amateurs ou professionnels.
Seize violonistes (8 amateurs et 8 professionnels) auxquels on a demandé d'exécuter les mouvements de la main gauche d'un concerto pour violon de Mozart ont été soumis à une analyse par IRMf. Sur les cartes d'activation des différentes zones du cortex moteur qui ont été obtenues, on observe que, comparés aux amateurs, les musiciens professionnels présentent une augmentation de l'activation de l'aire motrice primaire. Chez les amateurs, l'activation du cortex est plus diffuse et elle est étendue à d'autres aires corticales.

Analyser les effets de l'entraînement sur le cortex moteur

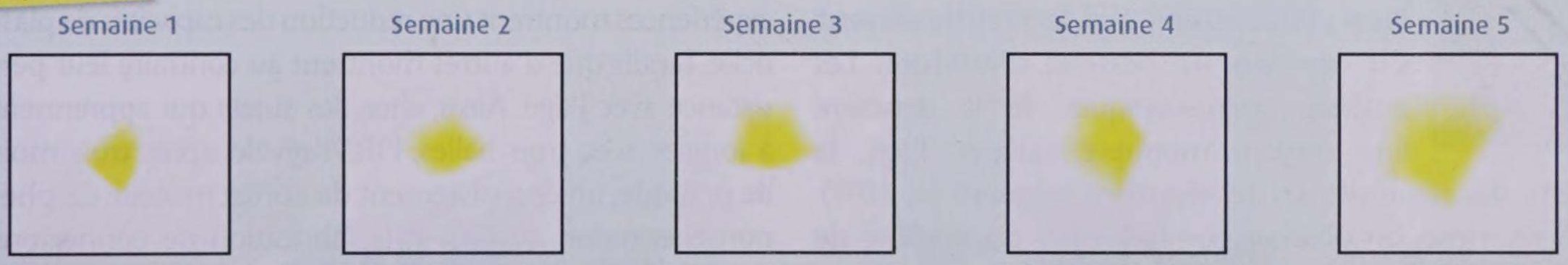


3 Les mains d'un pianiste. Les pianistes professionnels sont capables de jouer plusieurs dizaines de notes par minute et deux mélodies indépendantes (avec la main gauche et la main droite). Cette virtuosité est acquise au prix d'un travail continu (plusieurs heures par jour), le plus souvent depuis l'enfance. En cartouche, un extrait de la partition de l'une des pièces les plus virtuoses du répertoire du piano : le 3e concerto de Sergei Rachmaninov.

Expérience 1

Une seule main est entraînée à un exercice de piano pendant 20 minutes. Les cartes motrices sont déterminées avant et après la séance d'entraînement, pour les deux mains. L'expérience est renouvelée pendant 5 jours consécutifs.

Expérience 2



Pendant 5 semaines consécutives, une seule main est entraînée quotidiennement à un exercice de piano du lundi au vendredi. Les cartes motrices de cette main sont déterminées le lundi avant chaque entraînement.

4 Des modifications des cartes motrices des muscles de la main lors de l'apprentissage du piano. Les cartes motrices sont obtenues par simulation transcranienne (SMT, voir doc. 2 p. 346) chez des individus non professionnels pour différents muscles fléchisseurs des doigts.

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1.** Comparez les cartes motrices des deux individus, puis proposez des hypothèses pour expliquer l'origine de ces différences.

2 **DOC. 2.** Éprouvez l'une de vos hypothèses.

3 **DOC. 3 ET 4.** Précisez les effets de l'entraînement sur la carte motrice de la main.

4 **EN CONCLUSION.** Montrez que le cortex moteur présente une plasticité et expliquez l'importance de cette plasticité dans l'apprentissage moteur.

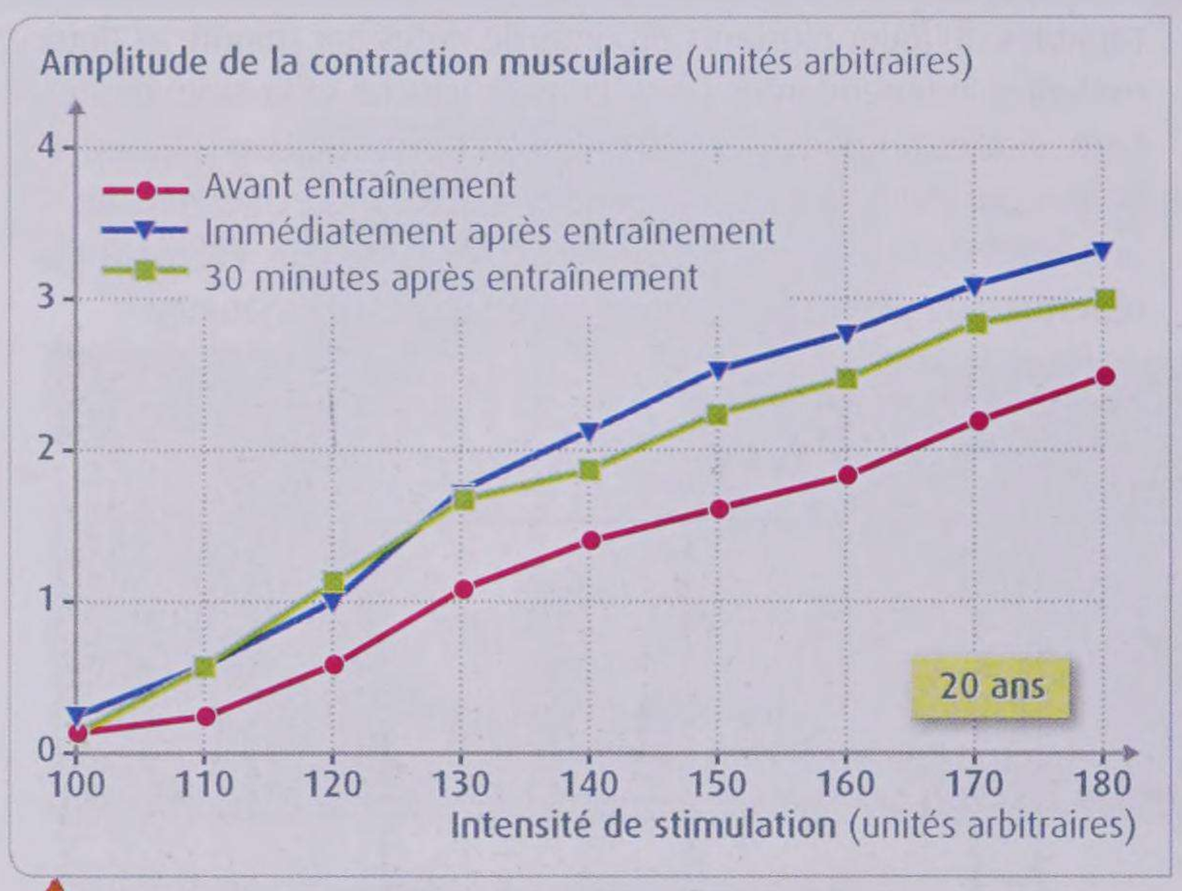
UNITÉ 4

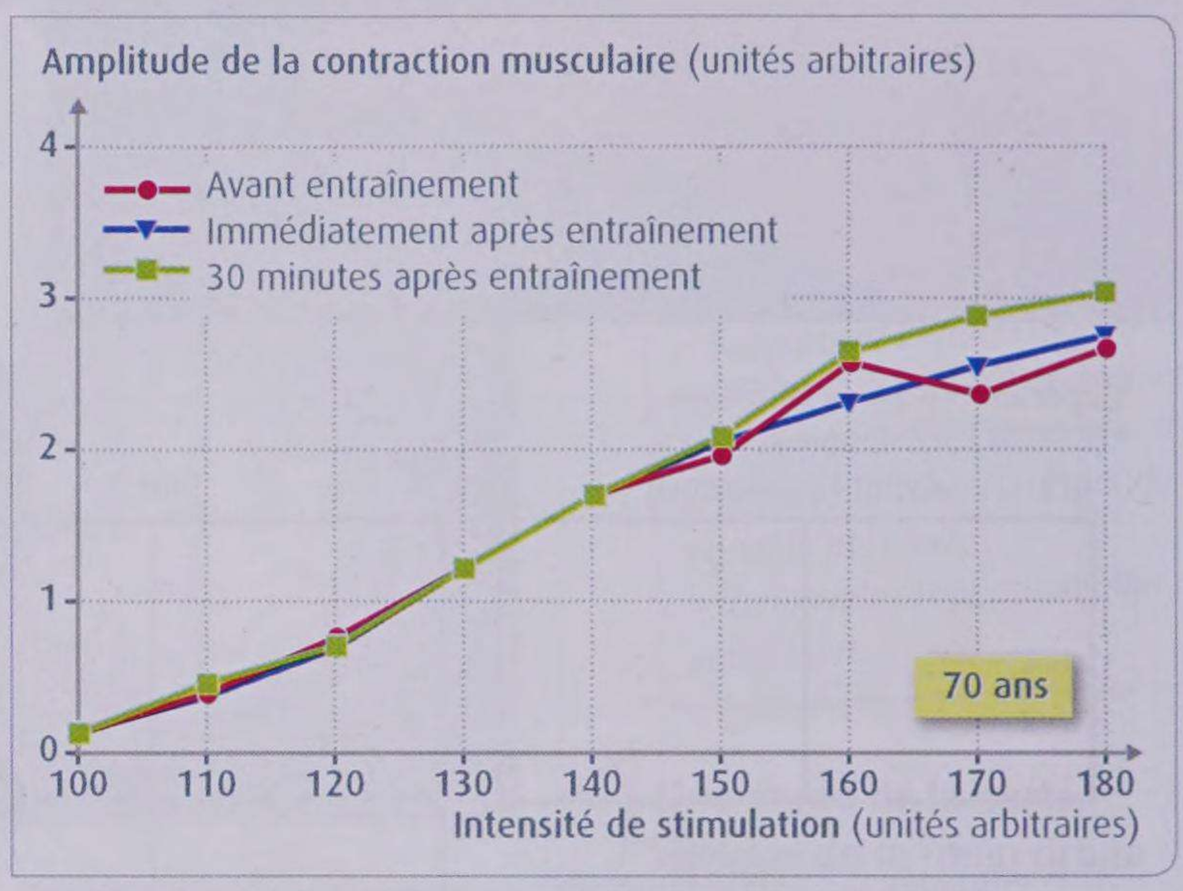
Plasticité cérébrale et médecine

Les remaniements des aires corticales motrices consécutives à l'entraînement témoignent de la plasticité du cortex cérébral moteur.

Comment la plasticité du cortex moteur est-elle mobilisée au cours de la vie d'un individu ?

Plasticité cérébrale et vieillissement





1 Une étude des effets de l'âge sur les facultés d'apprentissage moteur. Des chercheurs ont examiné les modifications du cortex moteur induit par un entraînement du pouce à un exercice de force. Ils ont évalué l'amplitude de la contraction de deux muscles du pouce induite par une stimulation du cortex moteur d'intensité croissante réalisée par SMT (voir doc. 2 p. 346). La mesure a été effectuée avant, immédiatement après et 30 minutes après l'entraînement. Une augmentation de la réponse musculaire après entraînement est le reflet de réaménagements du cortex moteur et donc de sa plasticité. L'étude a été menée chez 14 jeunes adultes (âge moyen 20 ans) et chez 14 adultes âgés en moyenne de 70 ans.

Interview de **Catherine Vidal**, chercheuse en neurobiologie

Nos conceptions sur le vieillissement du cerveau ne cessent d'évoluer. Les analyses microscopiques de la structure fine cerveau montrent qu'avec l'âge, la perte des neurones est relativement mineure (– 10%). En revanche, on observe une réduction du nombre de dendrites, d'axones et de synapses, ce qui serait à l'origine d'une moindre efficacité du transfert d'informations entre les neurones. Grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, on peut désormais étudier la plasticité cérébrale au cours du vieillissement. Au niveau du cortex moteur, certaines expériences montrent une réduction des capacités de plasticité, tandis que d'autres montrent au contraire leur persistance avec l'âge. Ainsi, chez des sujets qui apprennent à jongler avec trois balles, l'IRM révèle, après trois mois de pratique, un épaississement du cortex moteur. Ce phénomène, qu'on attribue à la fabrication de connexions synaptiques supplémentaires, est observé au même titre chez des personnes âgées de 20 ans ou de 60 ans. On a montré également un épaississement du cortex moteur chez des personnes âgées de 70 ans à la suite de six mois d'entraînement à la gymnastique aérobic.

2 Le cortex moteur vieillit-il ?

ACTIVITÉS

1 **DOC. 1 ET 2.** Décrivez, interprétez puis critiquez les résultats de l'expérience présentée doc. 1.

2 **DOC. 3.** Montrez qu'il peut y avoir récupération motrice suite à un AVC affectant le cortex moteur. Expliquez l'origine de cette récupération.

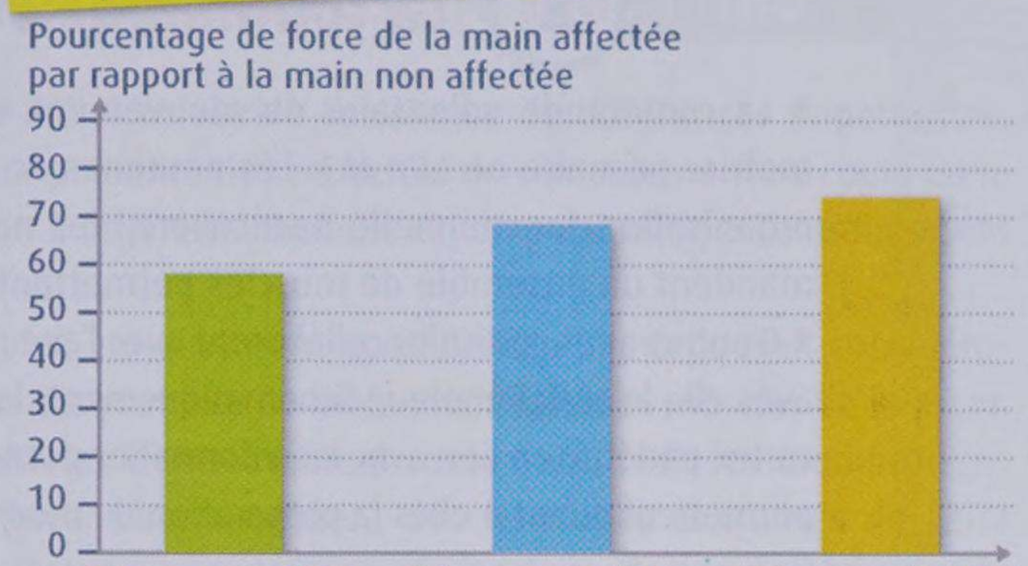
3 **DOC. 4.** Précisez quelles sont les conséquences d'une greffe des mains sur l'organisation du cortex moteur.

4 **EN CONCLUSION.** Précisez les effets du vieillissement sur la plasticité cérébrale et récapitulez les liens entre plasticité cérébrale et récupération motrice.

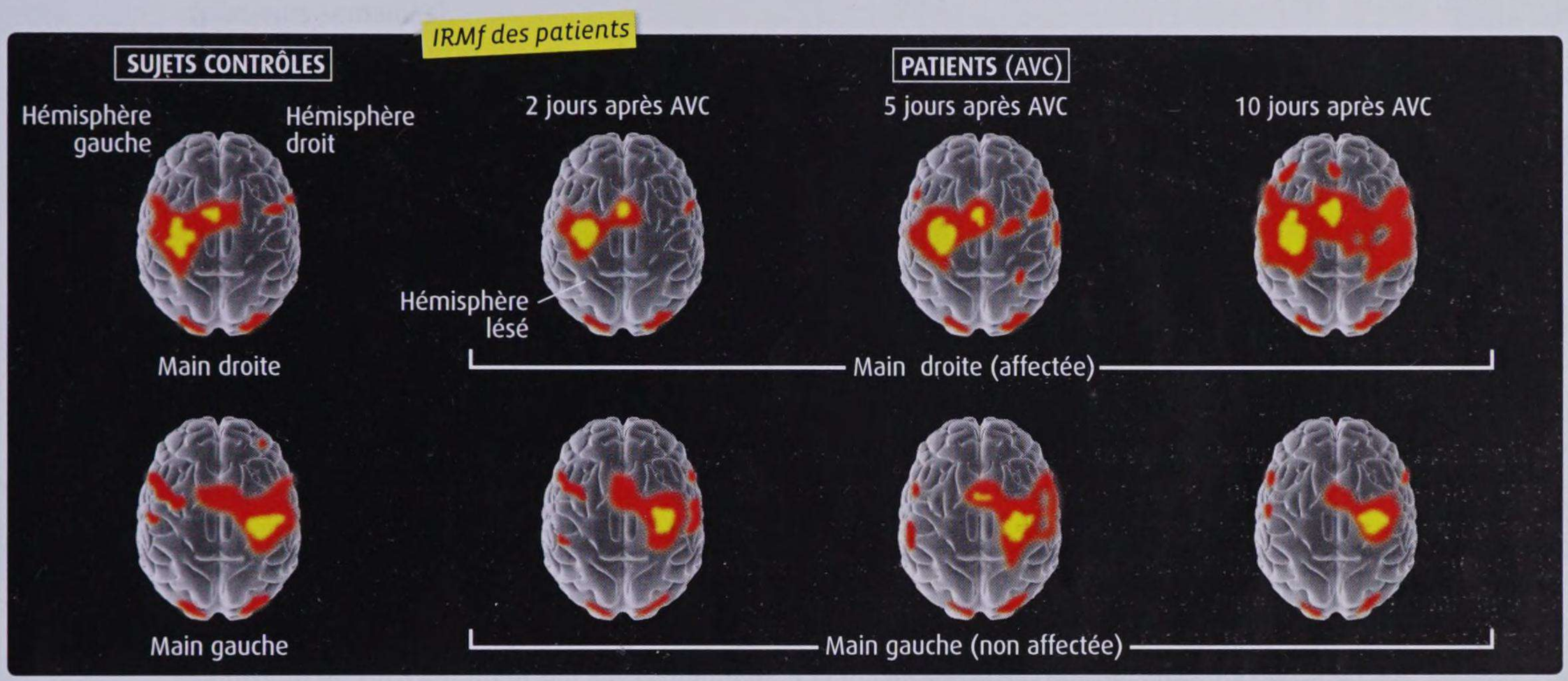
Plasticité cérébrale et facultés de récupération motrice

Lors d'un AVC, l'obstruction d'une petite artère interrompt la circulation sanguine dans la région qu'irriguait le vaisseau. Cela entraîne la mort d'un grand nombre de neurones dans cette zone. Onze patients ayant subi un AVC affectant le cortex moteur gauche ont été suivis. Tous présentaient un déficit moteur de la main droite. On a étudié par IRMf l'activité du cortex lorsque les patients fermaient le poing gauche ou le poing droit. L'expérience a été réalisée 2, 5 et 10 jours après l'AVC. Dans le même temps, la force de fermeture du poing droit a été évaluée.

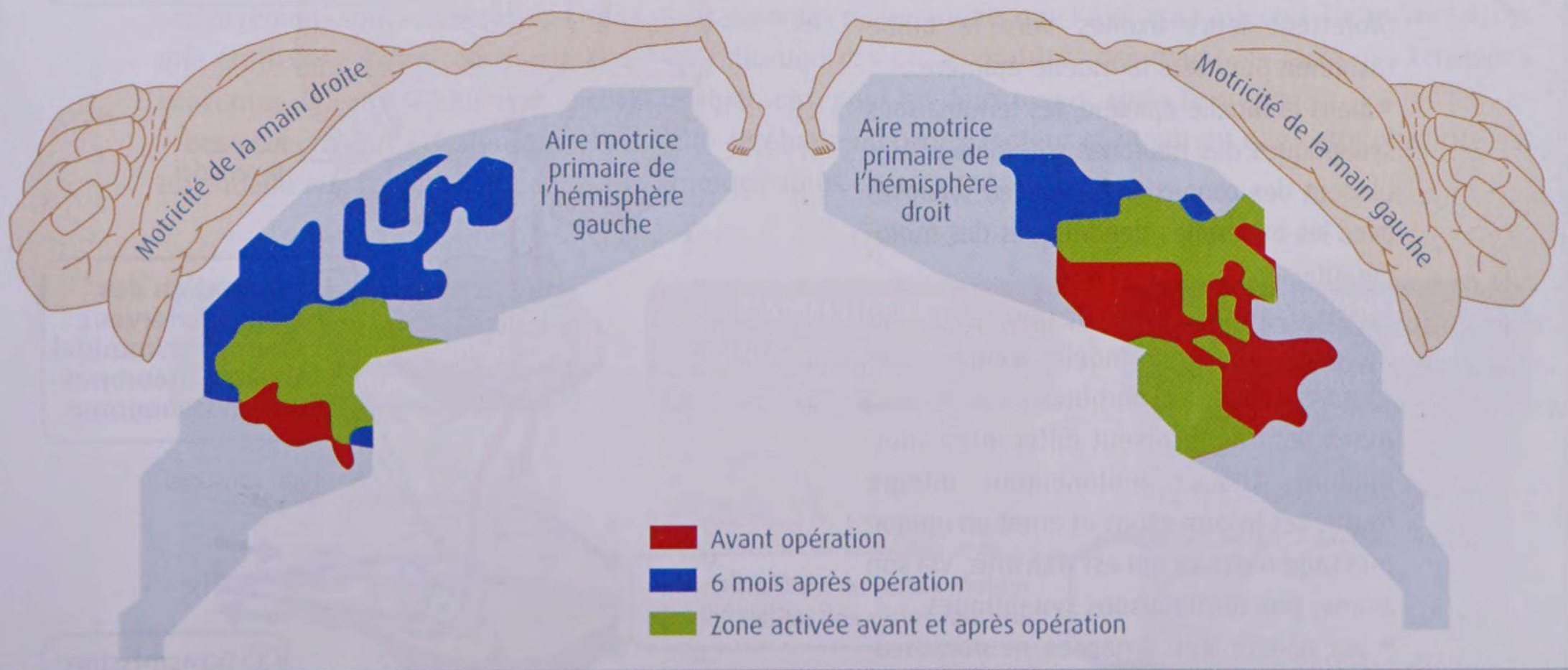
Récupération motrice des patients



IRMf des patients



3 Une étude de la récupération motrice après un accident vasculaire cérébral (AVC).



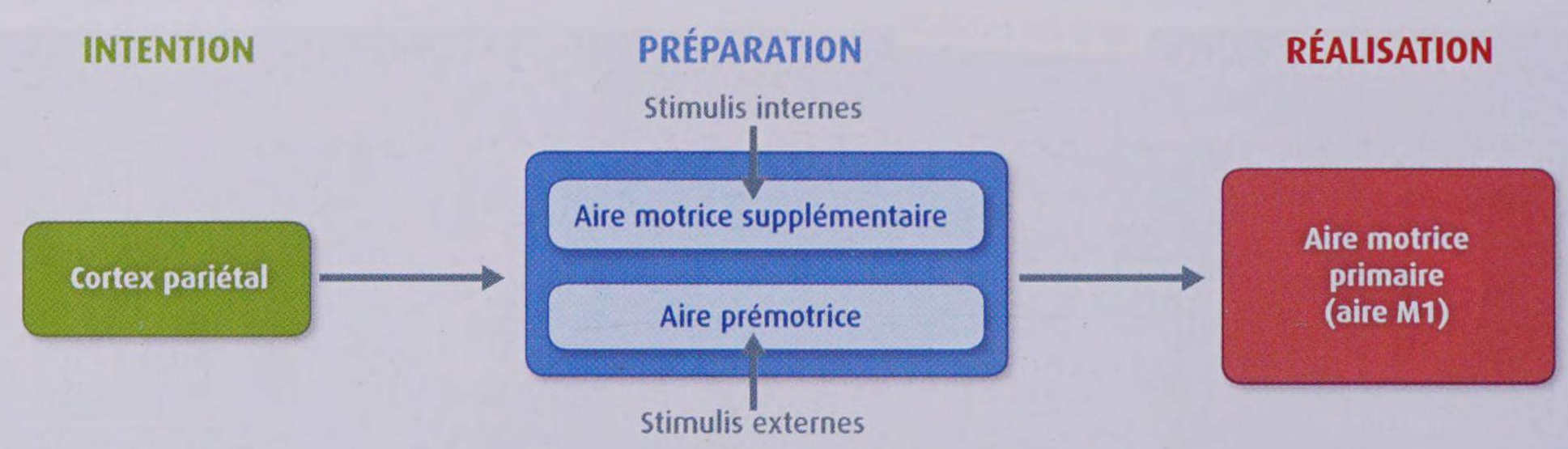
4 Une étude de la réorganisation du cortex moteur chez un patient ayant subi une greffe des deux mains.

Ce patient, amputé des deux mains en 1996, a pu être greffé en 2000 à Lyon. L'activité du cortex moteur primaire contrôlant le mouvement des mains est suivie par IRMf avant et après la greffe. Après la greffe, l'IRMf a été réalisée alors que le patient réalisait des mouvements de flexion et d'extension des doigts. Avant la greffe, ces mouvements ont été reproduits par une contraction assistée (palpation) des muscles de l'avant-bras. Cette contraction est normalement associée aux mouvements des doigts.

CHAPITRE 2 Motricité, volonté et plasticité cérébrale

UNITÉ 1 La commande volontaire du mouvement

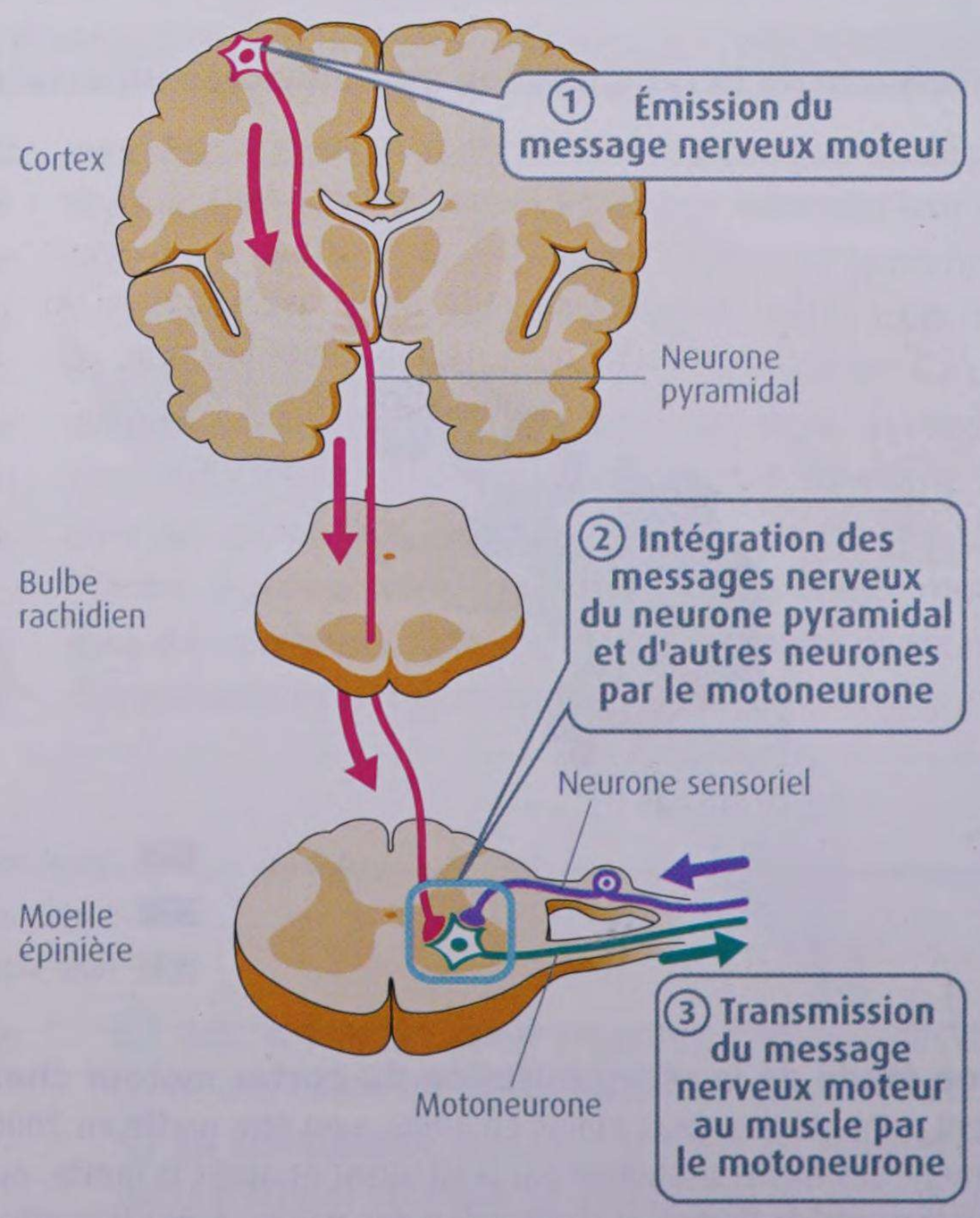
• La commande volontaire du mouvement est contrôlée par une région du cortex cérébral appelée aire motrice primaire ou aire M1. Les neurones de l'aire M1 contrôlent les mouvements des muscles grâce à une organisation fonctionnelle particulière : les neurones d'une région donnée de l'aire motrice primaire commandent un ensemble de muscles permettant la réalisation des mouvements d'une région donnée du corps.
• D'autres aires corticales collaborent avec l'aire motrice primaire dans la commande motrice volontaire et forment avec elle le cortex moteur. Schématiquement, les intentions de mouvement sont élaborées, entre autres, dans le cortex pariétal, en lien avec les informations sensorielles reçues. L'aire prémotrice et l'aire motrice supplémentaire permettent quant à elles la préparation du mouvement, en fonction des stimuli externes ou internes reçus.



Les collaborations entre aires corticales dans la commande du mouvement.

UNITÉ 2 Les voies motrices : du cortex aux muscles

• Le message nerveux moteur commandant un mouvement volontaire est élaboré au niveau des neurones pyramidaux de l'aire motrice primaire. Ces derniers projettent leurs axones vers le bulbe rachidien puis vers la moelle épinière.
• Dans la moelle épinière, les terminaisons synaptiques des neurones pyramidaux établissent des connexions appelées synapses avec les extrémités dendritiques des motoneurones.
• Par l'intermédiaire de synapses, les motoneurones de la moelle épinière sont en contact avec de nombreux autres neurones dont ils reçoivent différentes informations. Chaque motoneurone intègre toutes ces informations et émet un unique message nerveux qui est transmis, via son axone, aux terminaisons synaptiques.
• Au niveau des synapses neuromusculaires associées aux terminaisons synaptiques du motoneurone, le message nerveux induit la contraction des fibres musculaires.



Les voies motrices.

UNITÉ 3 Plasticité cérébrale et apprentissage moteur

- La comparaison des cartes motrices de plusieurs individus révèle l'existence de différences importantes. De fait, tout comme le cortex visuel, le cortex moteur présente des capacités de remaniement au cours de la vie, c'est-à-dire une plasticité. Cette plasticité est due à différents facteurs et, en particulier, à l'entraînement moteur.
- Des études réalisées par IRMf ont ainsi montré qu'un entraînement quotidien au piano pouvait considérablement accroître la taille des territoires de l'aire motrice primaire contrôlant certains des muscles de la main. Cet effet est observé après quelques dizaines de minutes d'entraînement seulement, mais les modifications du cortex moteur sont alors transitoires et réversibles. L'accroissement des territoires concernés de l'aire motrice primaire est toutefois stabilisé par un entraînement répété sur une période de temps plus grande (plusieurs semaines).
- La plasticité du cortex moteur est à la base des apprentissages moteurs.

UNITÉ 4 Plasticité cérébrale et médecine

- Certaines expériences suggèrent une réduction des capacités de plasticité du cortex cérébral moteur lors du vieillissement, tandis que d'autres montrent, au contraire, leur persistance avec l'âge. Ainsi, des études montrent que, lors de l'apprentissage du jonglage, des individus âgés de 70 ans témoignent d'une plasticité au niveau du cortex moteur qui est comparable à la plasticité observée chez des individus âgés de 20 ans.
- Chez des patients ayant subi un accident vasculaire cérébral (AVC) affectant les aires motrices corticales (et donc la motricité de certains muscles), on constate une récupération progressive des capacités motrices. Dans le même temps, les régions corticales endommagées retrouvent progressivement leurs fonctions et de nouvelles régions sont recrutées lors de la réalisation des mouvements que l'AVC avait affectés. De même, après une greffe des mains, on constate une modification des cartes motrices des mains : la taille des territoires concernés de l'aire M1 augmente considérablement, pour les deux mains, après la greffe.
- Ces observations attestent de la plasticité cérébrale du cortex moteur et montrent que cette plasticité est essentielle aux facultés de récupération motrice après un accident.

Causes et conséquences de la plasticité du cortex cérébral moteur.

L'ESSENTIEL

CHAPITRE 2

Motricité, volonté et plasticité cérébrale

L'essentiel par le texte

De la volonté au mouvement

• La réalisation des mouvements volontaires implique une collaboration entre plusieurs aires du cortex cérébral connectées entre elles. Ces **aires motrices** forment le **cortex moteur**.

• Au sein du cortex moteur, l'aire motrice primaire contrôle la réalisation des mouvements volontaires : chaque zone de cette aire commande la contraction des muscles d'une région donnée du corps.

• Les messages nerveux moteurs émis par l'aire motrice primaire cheminent par des faisceaux de neurones qui descendent dans la moelle épinière jusqu'aux motoneurones. Ces neurones établissent des contacts appelés **synapses** avec les **motoneurones**. Un motoneurone reçoit, par l'intermédiaire de ces synapses, des informations diverses qu'il intègre en émettant un unique message nerveux moteur. Ce message, transmis aux fibres musculaires par l'intermédiaire des synapses neuromusculaires, provoque leur contraction. Chaque fibre musculaire reçoit un message nerveux en provenance d'un seul motoneurone.

Motricité et plasticité cérébrale

• Lorsque l'on compare les **cartes motrices** de plusieurs individus, on observe des différences importantes. Ces différences s'expliquent par des remaniements du cortex moteur sous l'effet de l'apprentissage et de l'entraînement. Elles témoignent d'une **plasticité** du cortex moteur qui est à la base des apprentissages moteurs.

• La plasticité du cortex moteur explique également la récupération des fonctions motrices que l'on peut observer lorsque qu'une partie du cortex moteur est accidentellement lésée.

• Certaines études suggèrent que la plasticité du cortex moteur diminue lors du vieillissement. D'autres études montrent au contraire que cette plasticité persiste avec l'âge. On observe par ailleurs une perte de neurones lors du vieillissement, mais elle est relativement mineure.

Les capacités et attitudes

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations afin de caractériser les aires motrices cérébrales **(unité 1)**

▸ Recenser, extraire et exploiter des informations afin de caractériser la commande nerveuse d'un mouvement volontaire **(unité 2)**

▸ Recenser et exploiter des informations afin de mettre en évidence la plasticité du cortex moteur **(unités 3 et 4)**

▸ Percevoir le lien entre sciences et techniques **(unités 1 et 3)**

Mots clés

Voir aussi Dico des SVT p. 370

Aire motrice : région localisée du cortex cérébral (zone de faible épaisseur recouvrant la totalité du cerveau) qui participe à la planification, au contrôle et à l'exécution des mouvements volontaires. L'ensemble des aires motrices forme le cortex moteur.

Carte motrice : Ensemble des régions du cortex moteur qui sont activées lors de la réalisation d'un mouvement volontaire donné.

Cortex moteur : ensemble des aires cérébrales impliquées dans le contrôle de la motricité volontaire.

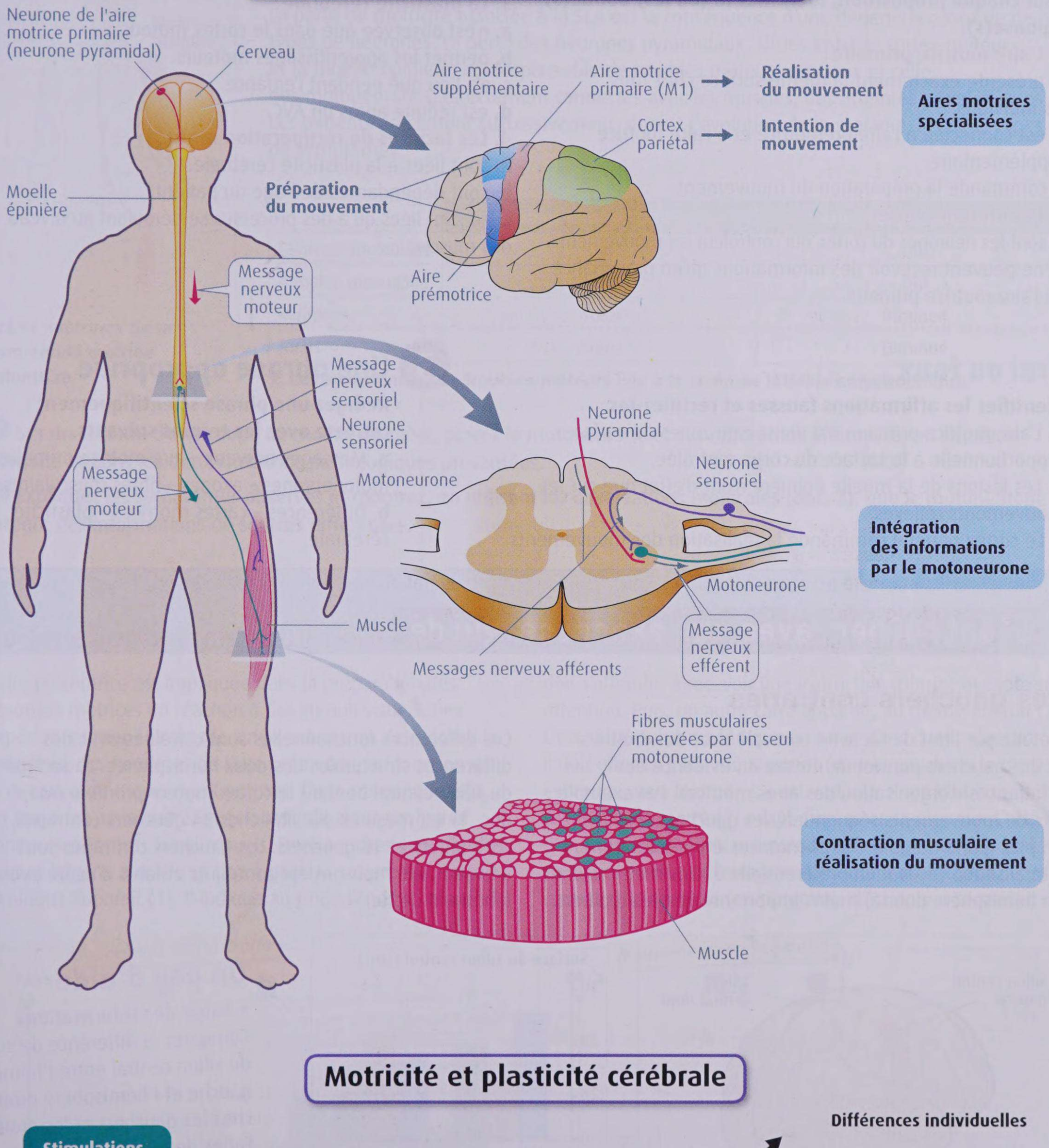
Motoneurone : neurone dont le corps cellulaire est situé dans la substance grise de la moelle épinière, qui innerve une série de fibres musculaires et permet leur contraction.

Plasticité cérébrale : capacité d'adaptation anatomique et fonctionnelle du cerveau en fonction des expériences vécues par l'individu.

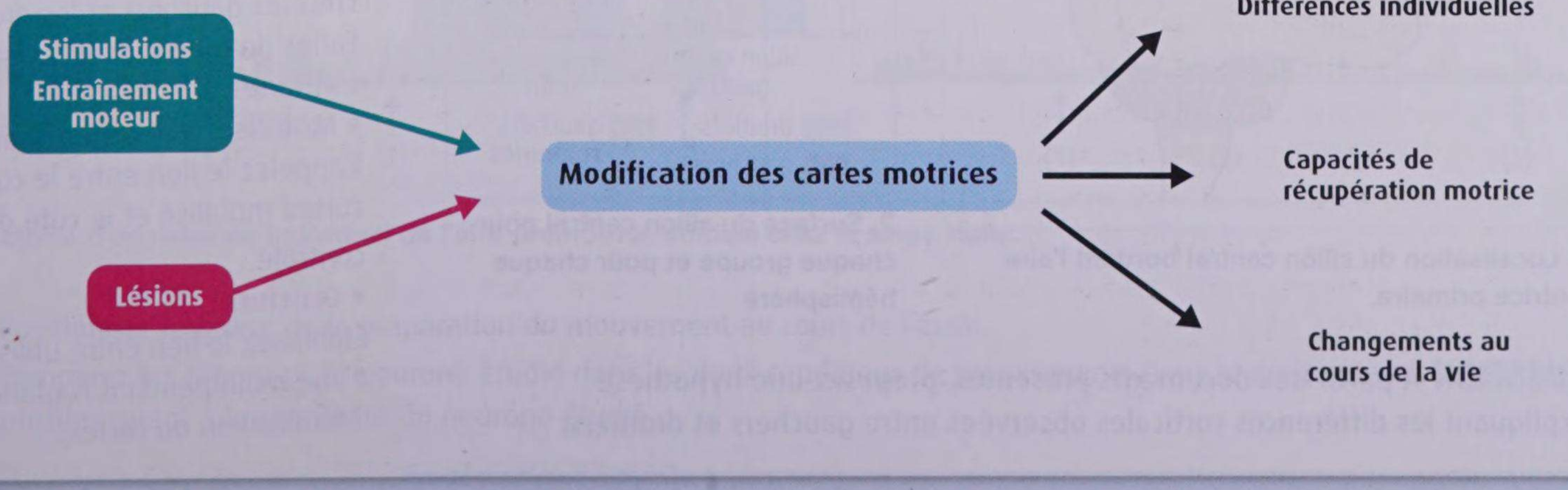
Synapse : zone de contact entre deux neurones permettant la transmission du message nerveux depuis le premier neurone vers le second.

L'essentiel par l'image

La commande volontaire du mouvement



Motricité et plasticité cérébrale



EXERCICES

évaluer ses connaissances

1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. L'aire motrice primaire :

a. présente exactement la même surface chez tous les individus.

b. est connectée à l'aire prémotrice et à l'aire motrice supplémentaire.

c. commande la préparation du mouvement.

2. Les motoneurones :

a. sont les neurones du cortex qui contrôlent les mouvements.

b. ne peuvent recevoir des informations qu'en provenance de l'aire motrice primaire.

c. sont connectés à plusieurs fibres musculaires d'un même muscle.

3. La plasticité cérébrale :

a. n'est observée que dans le cortex moteur.

b. permet les apprentissages moteurs.

c. n'a lieu que pendant l'enfance.

d. est réduite après un AVC.

4. Les facultés de récupération motrice :

a. sont liées à la plasticité cérébrale.

b. sont dépendantes de l'âge du patient.

c. ne sont liées qu'à des processus se déroulant au niveau des muscles.

2 Vrai ou faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

a. L'aire motrice primaire est divisée en zones de surface proportionnelle à la surface du corps contrôlée.

b. Les lésions de la moelle épinière n'ont d'effet que sur les mouvements réflexes.

c. Le cortex pariétal commande la réalisation des mouvements.

3 Une phrase appropriée

Rédigez une phrase scientifiquement correcte avec les termes suivants.

a. Messages nerveux – aire motrice primaire – motoneurones – axones – fibres musculaires.

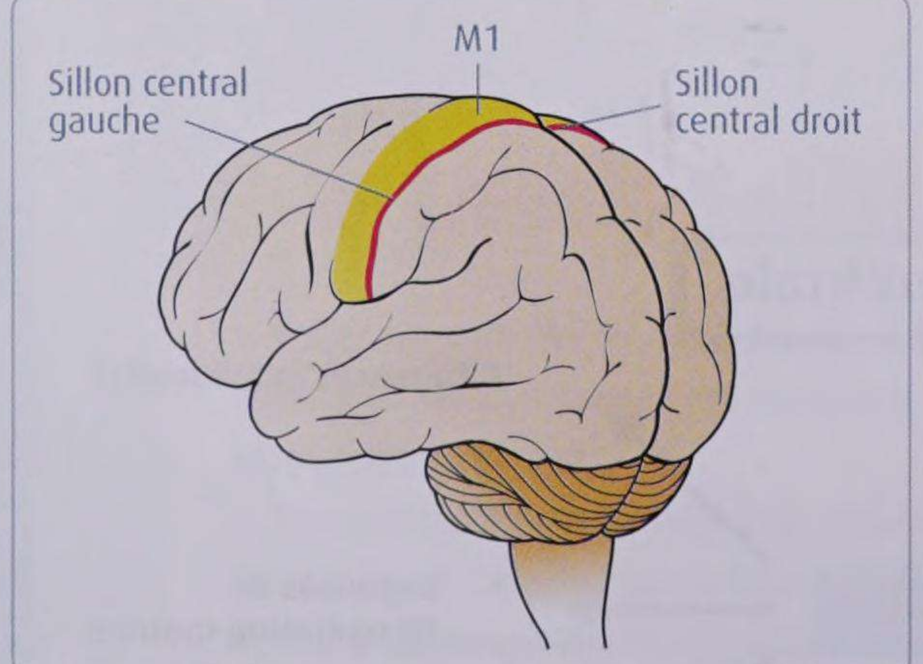
b. Différences – cartes motrices – plasticité cérébrale.

s'entraîner avec un exercice guidé

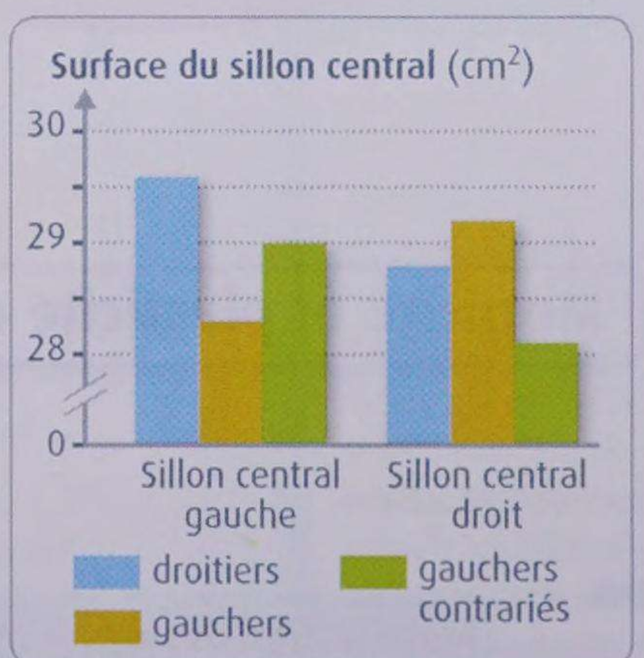
4 Les gauchers contrariés

L'étude par IRMf de l'activité corticale chez des droitiers et des gauchers permet de mettre en évidence des différences d'organisation des aires motrices. Par exemple, lors de mouvements séquentiels, les gauchers activent un plus grand nombre d'aires motrices et montrent une latéralisation (activation préférentielle d'aires motrices dans un hémisphère donné) moins importante que les droitiers.

Ces différences fonctionnelles sont corrélées avec des différences structurales des deux hémisphères. La surface du sillon central bordant le cortex moteur primaire (M1, doc. 1) est mesurée par IRM chez 34 gauchers contrariés, 23 droitiers et 18 gauchers. Les gauchers contrariés sont nés gauchers mais ont été contraints enfants d'écrire avec leur main droite.



1. Localisation du sillon central bordant l'aire motrice primaire.



2. Surface du sillon central pour chaque groupe et pour chaque hémisphère

QUESTION À partir des documents présentés, proposez une hypothèse expliquant les différences corticales observées entre gauchers et droitiers.

Un peu d'aide

• Saisir des informations

Comparez la différence de surface du sillon central entre l'hémisphère gauche et l'hémisphère droit chez les gauchers et les droitiers. Faites de même chez les gauchers contrariés.

• Mobiliser ses connaissances

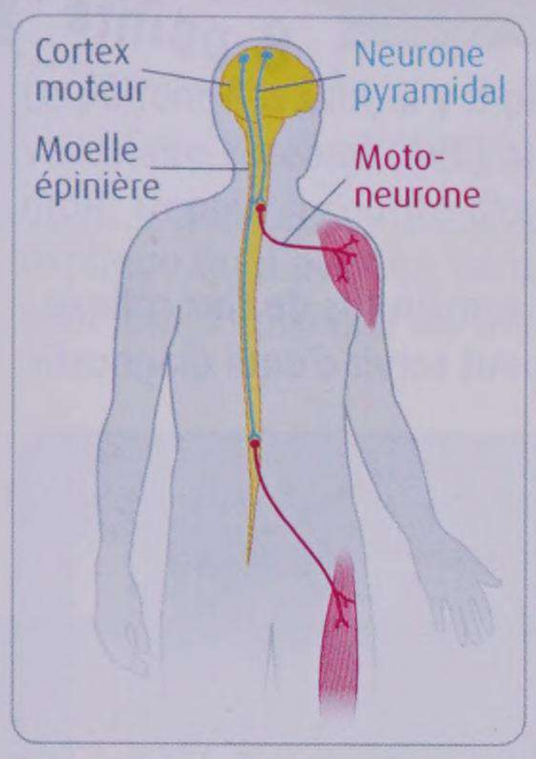
Rappelez le lien entre le côté du cortex mobilisé et le côté du corps contrôlé.

• Conclure

Établissez le lien entre utilisation d'une main pendant l'enfance et latéralisation du cortex.

5 Une grave maladie du système moteur

Mettre en relation des observations avec ses connaissances



1. Les neurones de la commande motrice volontaire.

La sclérose latérale amyotrophique (SLA), ou maladie de Charcot, est une maladie neurologique progressive et très invalidante touchant sélectivement les systèmes moteurs. La perte de motricité associée à la SLA est la conséquence d'une dégénérescence de deux types de neurones. La perte des neurones pyramidaux, situés entre le cortex moteur et la moelle épinière, est responsable de troubles moteurs centraux et celle des motoneurones, directement connectés avec les muscles, des atteintes périphériques. Les patients présentent successivement, durant l'évolution de la maladie, les deux types de symptômes.

	Troubles moteurs centraux	Atteintes périphériques
Faiblesse musculaire	Oui	Oui
Atrophie musculaire	Non	Oui
Réflexes	Accru	Diminué
Tonus	Accru	Diminué

2. Les symptômes des troubles moteurs liés à la sclérose latérale amyotrophique.

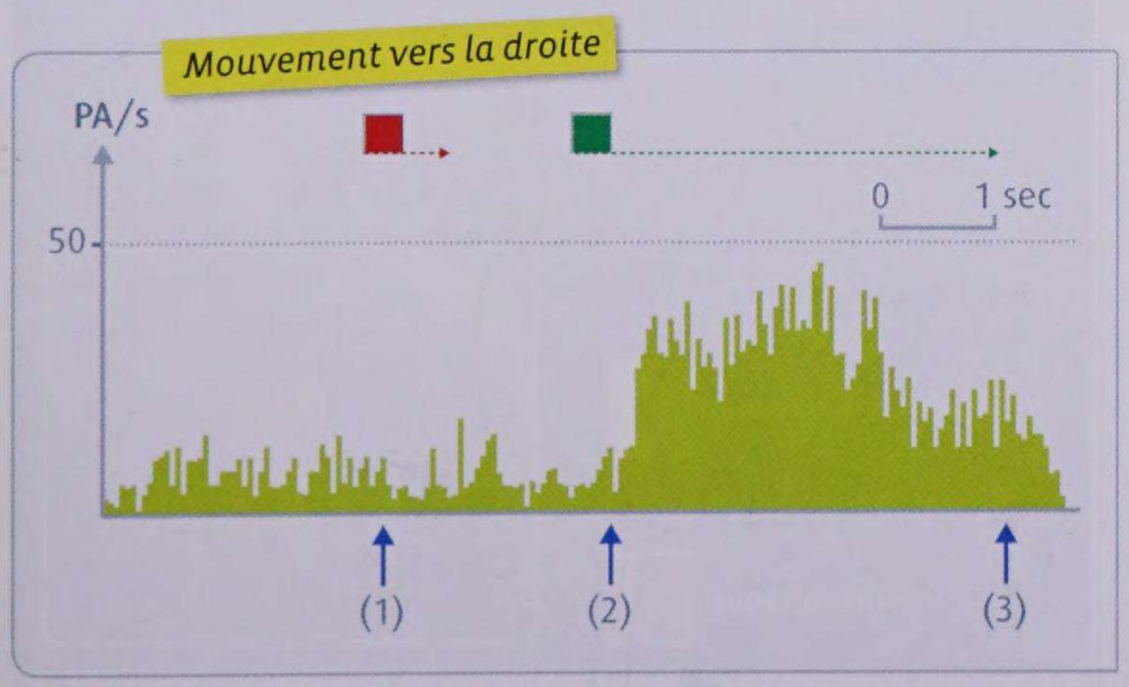
❶ Sur un schéma d'une coupe de moelle épinière, placez le motoneurone et ses différentes afférences, en situation normale et dans les deux situations pathologiques présentées.

❷ Expliquez les symptômes observés et montrez, en utilisant les observations médicales (doc. 2), que le motoneurone intègre des informations de sources différentes.

6 Le fonctionnement d'un neurone de l'aire prémotrice

Analyser une expérience

L'aire prémotrice est impliquée dans la préparation des réponses motrices en réaction à des stimuli visuels. Des expériences menées chez le singe ont permis de préciser la spécificité des neurones de l'aire prémotrice en fonction de la direction du mouvement préparé. Dans ces expériences, un singe est assis face à un écran d'ordinateur sur lequel sont présentés les stimuli visuels. Deux touches sont placées devant lui, une à droite et une à gauche. Un premier carré lumineux apparaît (1). Il indique au singe l'endroit auquel il doit s'attendre à recevoir une instruction motrice et capte son attention. Puis, un autre carré apparaît, au même endroit (2). C'est ce stimulus qui indique au singe dans quelle direction il doit effectuer son mouvement (vers la gauche si le carré est rouge, vers la droite s'il est vert). Le singe doit attendre l'extinction du carré (3) avant d'exécuter sa réponse. L'activité d'un neurone de l'aire prémotrice est enregistrée pendant plusieurs essais, les histogrammes montrent l'activité cumulée du neurone (en potentiels d'action par seconde).



1. Activité d'un neurone individuel de l'aire prémotrice étudiée chez le singe vigile.

❶ Positionnez la phase de la préparation du mouvement au cours de l'essai.

❷ Comparez les réponses du neurone étudié dans les deux conditions de mouvements (vers la droite et vers la gauche) et concluez quant à la spécificité du neurone étudié.

EXERCICES objectif BAC

Restitution organisée des connaissances

8 points

1 Le réflexe myotatique, un outil diagnostic

Le marteau à reflexe est un instrument couramment utilisé par les médecins lors des examens cliniques.

QUESTION **Après avoir présenté les différents éléments constitutifs de l'arc réflexe, vous expliquerez en quoi le réflexe myotatique rotulien peut servir d'outil diagnostic pour apprécier l'intégrité du système neuromusculaire.**

✔ Votre réponse inclura une introduction, un développement structuré et une conclusion sous forme d'un schéma bilan.

exploiter des résultats expérimentaux

3 points

2 Les expériences historiques de Claude Bernard sur le curare

Le curare est un poison utilisé par les Indiens d'Amérique pour chasser. En 1844, le physiologiste français Claude Bernard (1813-1878) commence ses études sur les effets du curare. Il les poursuit pendant le reste de sa vie. Elles lui permettent de comprendre et d'énoncer certains principes de base du fonctionnement neuromusculaire.
Chez la grenouille, l'ensemble nerf-muscle est isolé et soumis à des stimulations électriques en présence de curare. Le site de stimulation varie ainsi que la partie de l'ensemble nerf-muscle placée dans un bain de curare.
En outre, chez une grenouille, une patte a été isolée de la circulation sanguine générale par ligature, de telle sorte que le curare injecté dans le dos ne parvienne pas au membre ligaturé.

QCM

Pour chaque question, sélectionnez la bonne réponse.

1. La ligature d'un des membres de la grenouille :

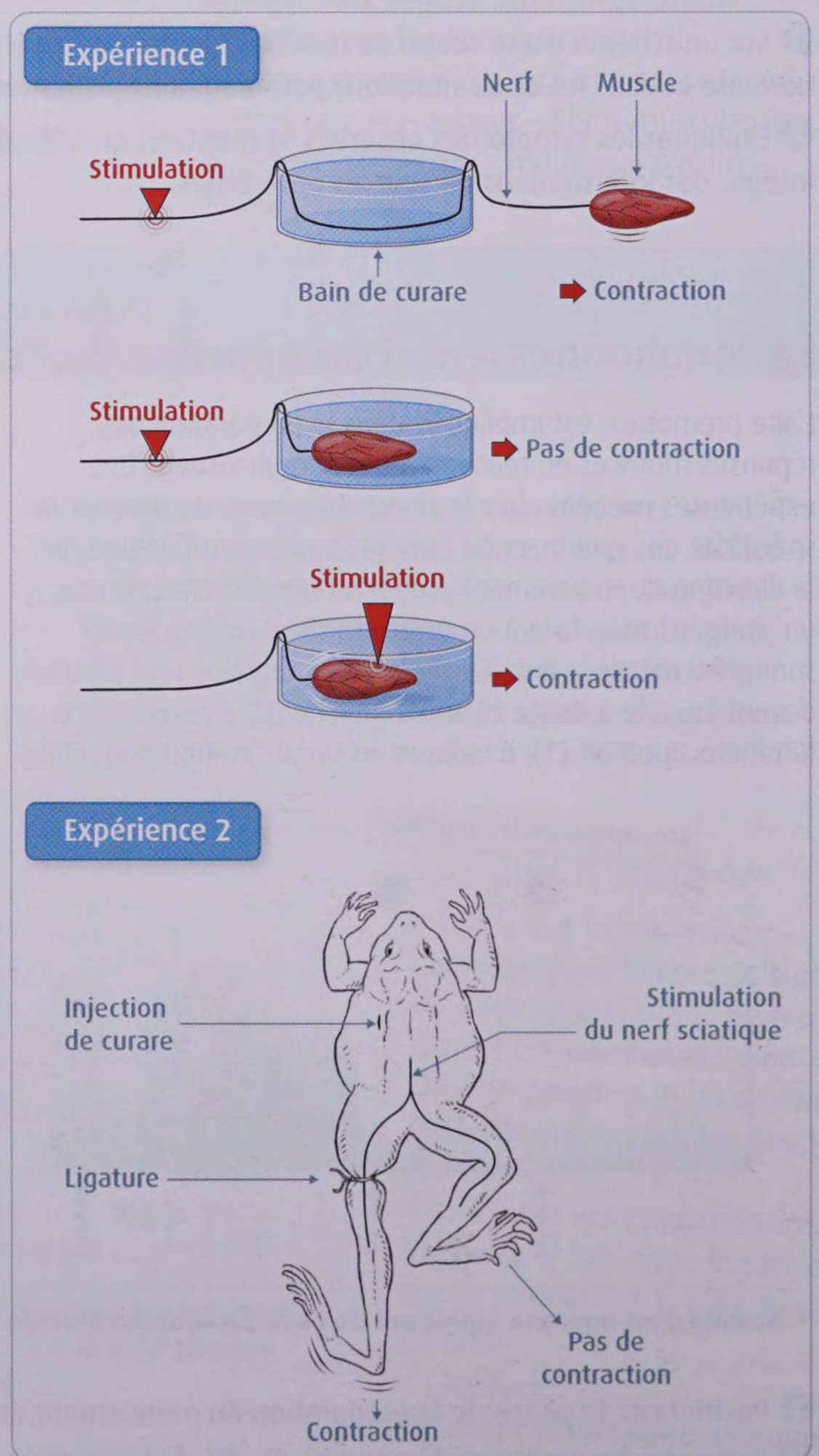
a. bloque le passage du message nerveux.
b. entraîne la mort des tissus de la jambe.
c. permet de concentrer le curare dans le membre ligaturé.
d. préserve l'extrémité du nerf sciatique de l'action du curare.

2. Le curare agit :

a. le long des nerfs où il perturbe la propagation du message nerveux.
b. au niveau des fibres musculaires dont il empêche la contraction.
c. à la jonction neuromusculaire où il bloque la transmission du message nerveux.
d. au point de stimulation où il bloque la naissance du message nerveux.

3. Ces expériences ont permis de mettre en évidence :

a. la nature du message nerveux.
b. le site d'action du curare.
c. la cible moléculaire du curare.
d. la vitesse de transmission du message nerveux.



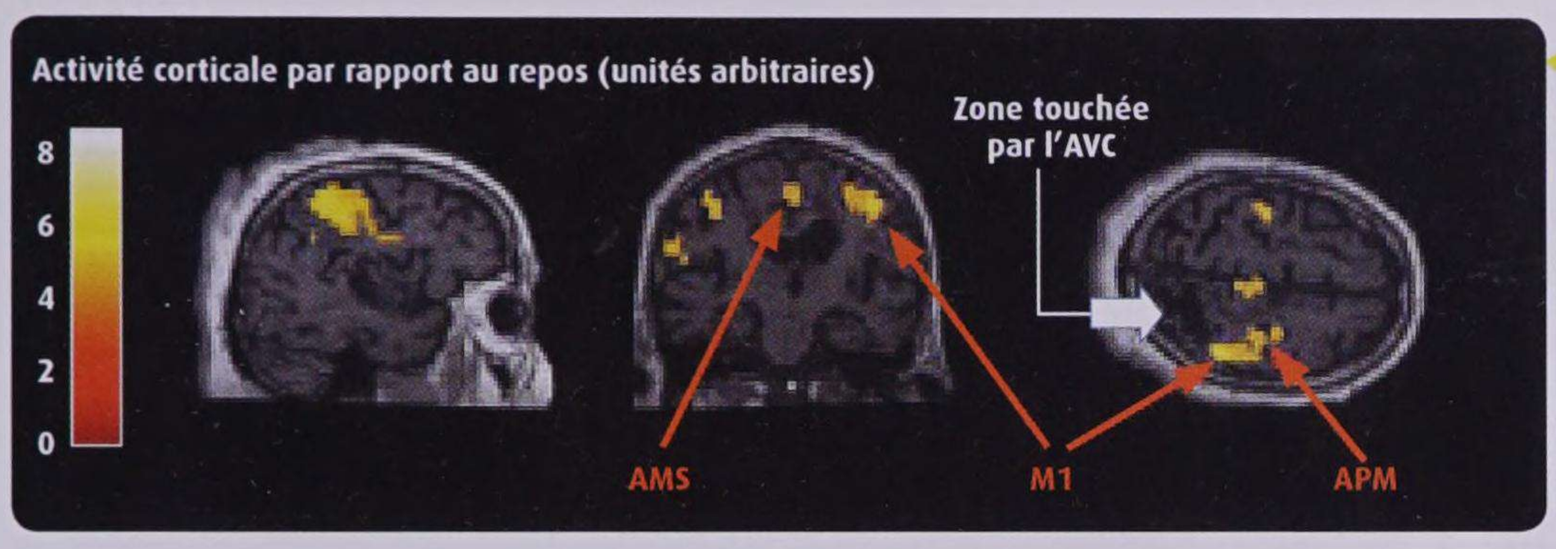
1 Les expériences de Claude Bernard.

Résoudre un problème scientifique

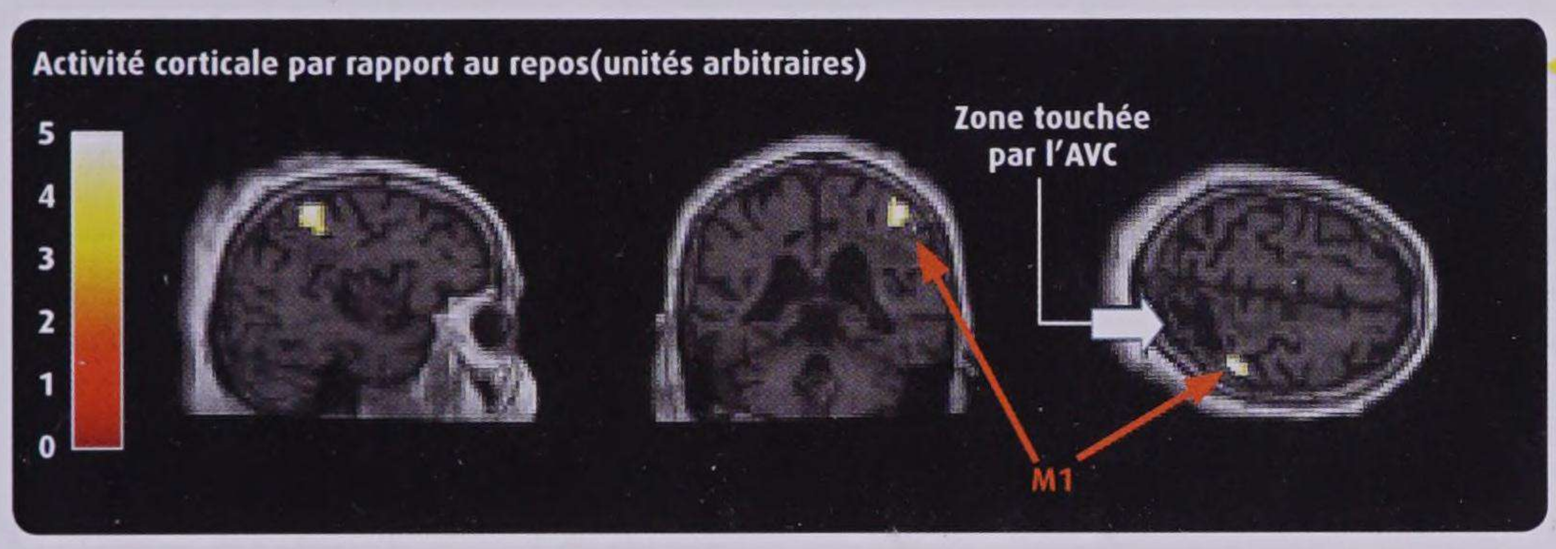
5 points

3 Le syndrome de la main étrangère

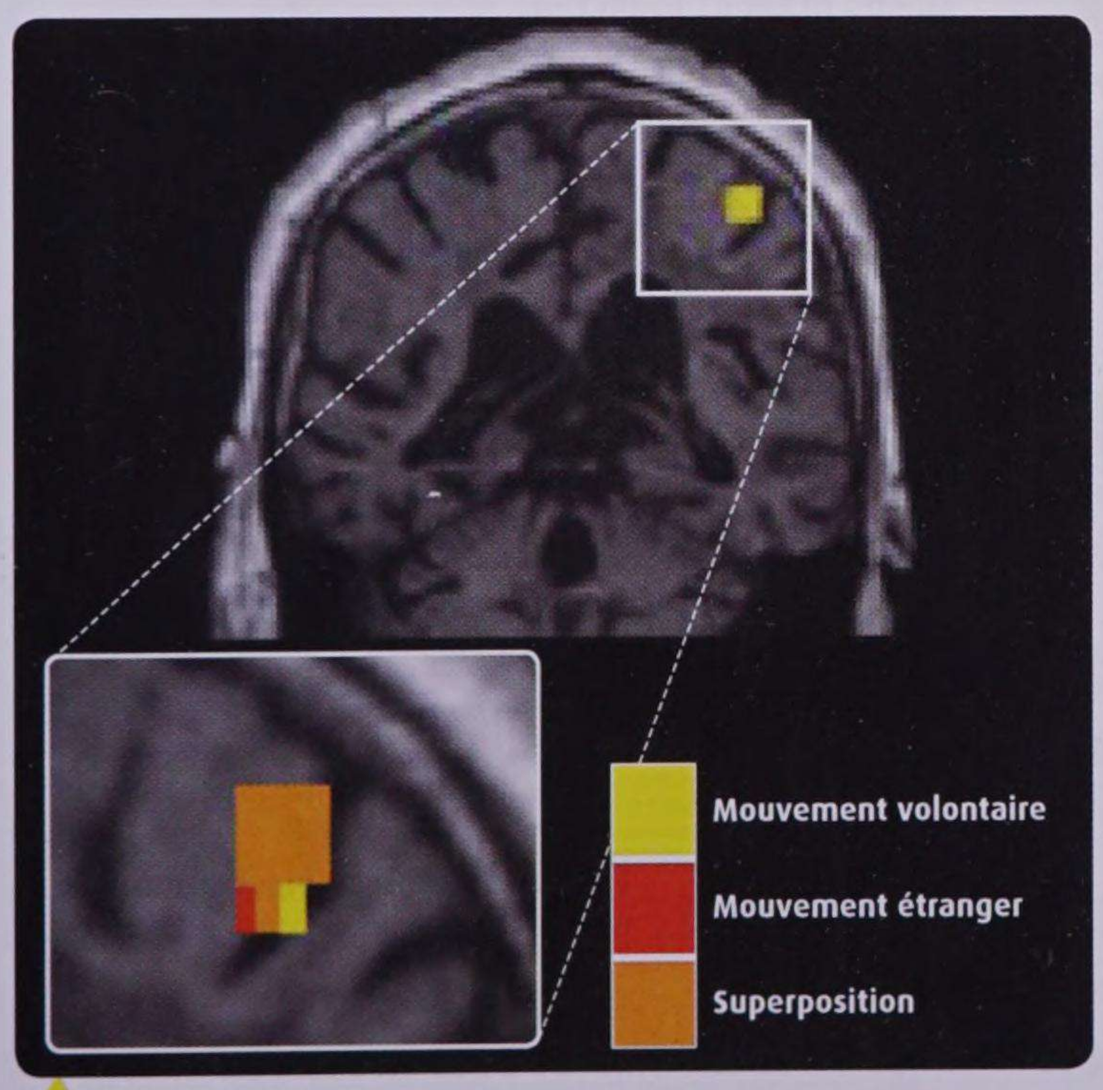
Le patient P a subi, il y a plusieurs mois, un accident vasculaire cérébral (AVC) au niveau du cortex pariétal droit. Depuis, il souffre d'un étrange syndrome. Il explique qu'il peut en général contrôler sa main gauche, sauf lors d'épisodes de crises. Il a alors l'impression de ne plus en être propriétaire : elle s'anime de mouvements automatiques involontaires (mouvements étrangers). Vous êtes neurologue et vous prescrivez au patient P une série d'IRM fonctionnelles visant à déterminer l'origine de ses troubles.



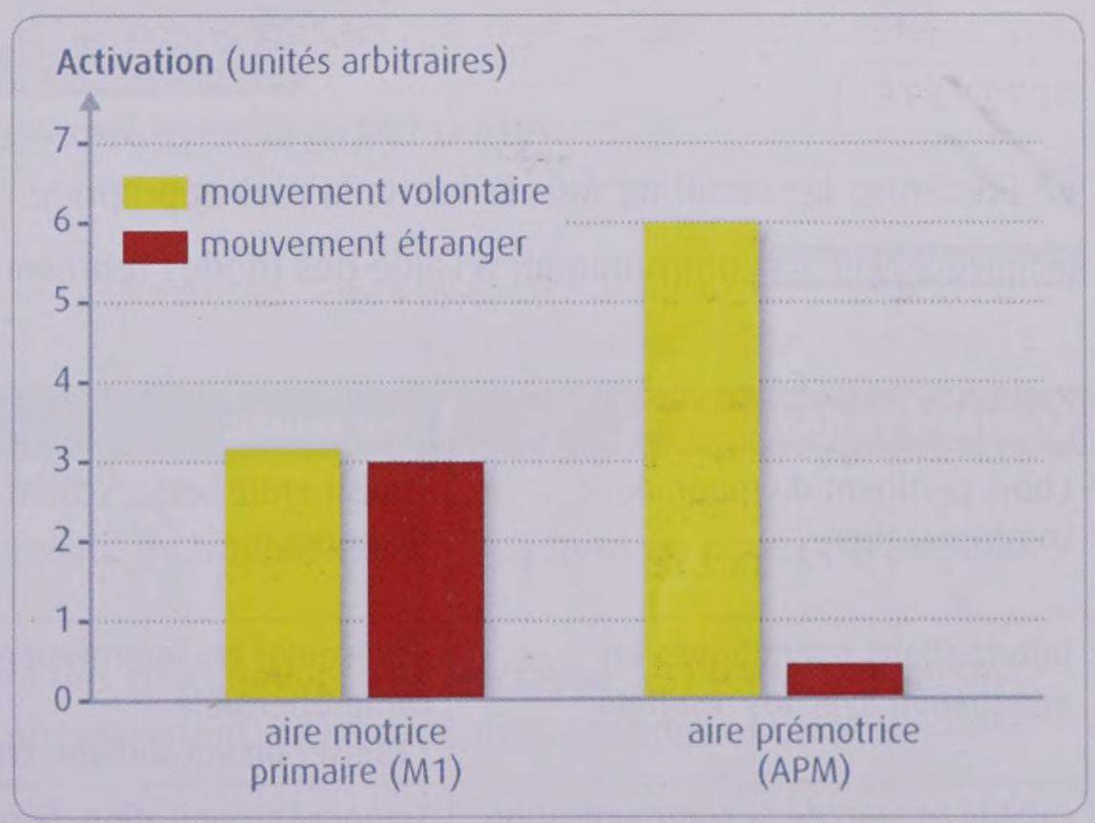
1 Carte motrice obtenue par IRMf de l'activité du cortex cérébral du patient, réalisée lors d'un mouvement volontaire de la main gauche. AMS : aire motrice supplémentaire ; M1 : aire motrice primaire ; APM : aire prémotrice.



2 Carte motrice obtenue par IRMf de l'activité du cortex cérébral du patient, réalisée lors d'un mouvement étranger de la main gauche.



4 L'activation comparée de M1 lors d'un mouvement volontaire et lors d'un mouvement étranger. Les cartes motrices obtenues lors d'un mouvement étranger et lors d'un mouvement volontaire sont superposées. La région correspondant à M1 est analysée en détail, de manière à comparer son activation durant les deux types de mouvements.



3 Quantification de l'activation des aires motrices chez le patient P. L'analyse des images obtenues permet de quantifier l'activation de l'aire motrice primaire (M1) et de l'aire prémotrice (APM).

QUESTION En prenant appui sur vos connaissances et sur les documents, proposez une hypothèse pour expliquer l'origine des troubles observés chez le patient P.

1 La recherche d'une infection chez une souris

Lors qu'elle est infectée par un microorganisme, une souris produit des anticorps qui se fixent sur les antigènes de l'agent infectieux. Ces anticorps sont présents dans le sérum et détectables par électrophorèse.

On cherche à déterminer si une souris a été infectée par un agent infectieux.

ACTIVITÉ

❶ Concevez une manipulation utilisant une électrophorèse afin de déterminer si la souris étudiée a été infectée ou non.

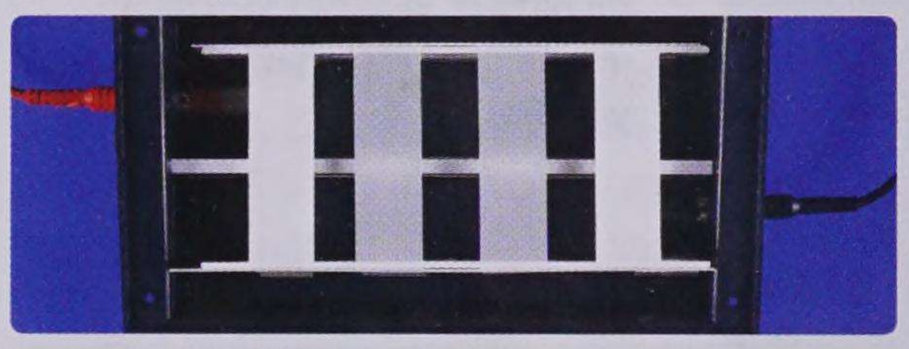
Capacité évaluée Concevoir un protocole.

Pour réussir Présenter la technique d'identification des anticorps par électrophorèse ; concevoir des témoins (positif et négatif) permettant l'interprétation des résultats pour le sérum de la souris à tester.

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Mettre en œuvre le protocole (voir doc. 2, p. 284).

Capacité évaluée Réaliser une manipulation en suivant un protocole.



Le dispositif d'électrophorèse.

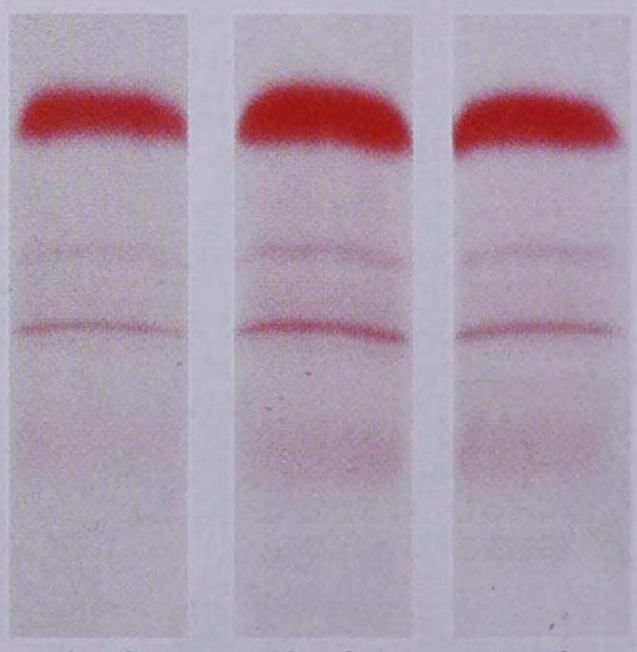
Critères d'évaluation	Pour réussir
Respect des étapes du protocole	• Fixer les 3 bandes sur le portoir • Placer le portoir dans la cuve • Verser le tampon et faire les dépôts de sérums • Fermer la cuve • Raccorder la cuve au générateur et mettre sous tension
Utilisation maîtrisée du matériel et organisation de la paillasse	• Adapter le niveau du tampon • Mettre en place les bandes dans l'ordre • Déposer les sérums au même niveau à la cathode • Colorer les bandes fournies en suivant le protocole

ACTIVITÉ

❸ Présentez les résultats sous la forme la plus appropriée.

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes représentation.

Critères d'évaluation	Pour réussir
Choix pertinent du mode de communication	Choisir entre texte, schéma, tableau, photo numérique
Informations scientifiques en adéquation avec les résultats	• Présenter les informations de manière exacte et compréhensible • Utiliser un vocabulaire scientifique adapté
Qualité et soin de la communication	Soigner l'organisation, la mise en page et l'orthographe



Témoin négatif **Témoin positif** **Souris à tester**

Les résultats de l'électrophorèse.

ACTIVITÉ

❹ Concluez en argumentant la réponse.

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Comparer le résultat de l'électrophorèse de la souris à tester à celui du témoin positif et du témoin négatif ; en tirer une conclusion sur la composition du sérum de la souris à tester ; répondre au problème posé.

2 La composition du nerf et les variations de l'amplitude de sa réponse

Lors du réflexe myotatique, les messages nerveux sensoriels et moteurs circulent dans les nerfs rachidiens. Lorsque l'on stimule électriquement un nerf, on observe l'apparition d'une différence de potentiel (ddp) à la surface de ce dernier. Cette ddp est liée à la transmission du message nerveux par le nerf. La valeur de la ddp mesurée augmente avec l'intensité de la stimulation du nerf.

On cherche à expliquer les variations de l'amplitude de la réponse du nerf.

ACTIVITÉ

❶ Envisagez une observation permettant d'apporter un élément de réponse à la question posée.

Capacité évaluée Proposer une démarche de résolution.

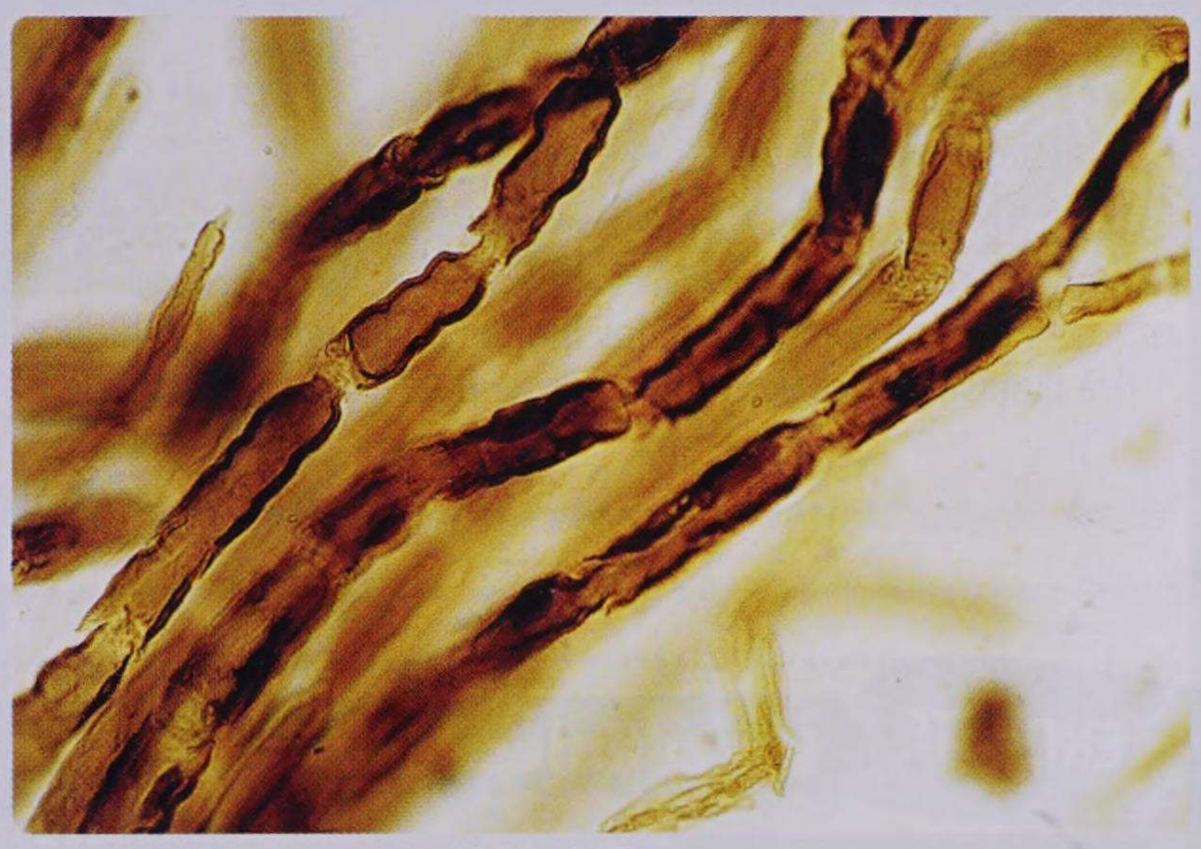
Pour réussir Montrer qu'une observation de la structure du nerf peut permettre de répondre au problème posé.

UTILISER UNE TECHNIQUE

❷ Réalisez une préparation microscopique d'un nerf dilacéré. Utilisez le microscope pour centrer la préparation sur une zone judicieusement choisie.

Capacité évaluée Réaliser une préparation et utiliser le microscope.

Critères d'évaluation	Pour réussir
Qualité de la préparation microscopique	Obtenir une préparation fine, sans bulles ni débordement
Réalisation des réglages et utilisation des objectifs	• Régler l'éclairage et le diaphragme • Choisir l'objectif adapté
Exploration de la préparation	Bien choisir la zone présentée



Nerf dilacéré observé au MO (x 310).

ACTIVITÉ

❸ Réalisez un dessin d'observation de la préparation microscopique ci-dessus.

Capacité évaluée Communiquer à l'aide des modes de représentation.

Critères d'évaluation (1) Représentation fidèle au modèle ; (2) qualité du trait de crayon ; (3) mise en page ; (4) contenu scientifiquement correct.

Pour réussir (1) Respecter les proportions et les formes ; (2) faire des traits nets et fins au crayon ; (3) centrer le dessin sur la page, bien disposer les légendes, indiquer un titre et un grossissement ; (4) fournir des légendes et un titre scientifiquement corrects.

ACTIVITÉ

❹ Mettez en relation votre observation et les données du problème pour conclure. Envisagez une autre manipulation pour compléter la réponse.

Capacité évaluée Adopter une démarche explicative.

Pour réussir Conclure sur la composition d'un nerf ; expliquer, à partir de la composition du nerf, les variations de la réponse de ce dernier pour des intensités de stimulation croissantes ; rechercher l'intérêt de manipuler avec des fibres nerveuses.

ATELIERS D'EXPLORATION

SCIENCES ACTUALITÉ — L'homme bionique

En mai 2001, l'Américain Jesse Sullivan, qui travaillait en tant qu'électricien sur les lignes haute tension, s'électrocute gravement. Ses bras doivent alors être amputés. Des médecins américains lui proposent de recourir à deux prothèses bioniques de bras, qu'il peut commander librement. Premier homme à porter ce type de prothèse, il a depuis repris des activités courantes comme pêcher, tondre la pelouse, faire la cuisine ou prendre dans ses bras ses petits enfants...

Jesse Sullivan et Claudia Mitchell, la première femme équipée de prothèses bioniques.

ACTIVITÉS

❶ Expliquez le principe de fonctionnement des bras bioniques de Jesse Sullivan.

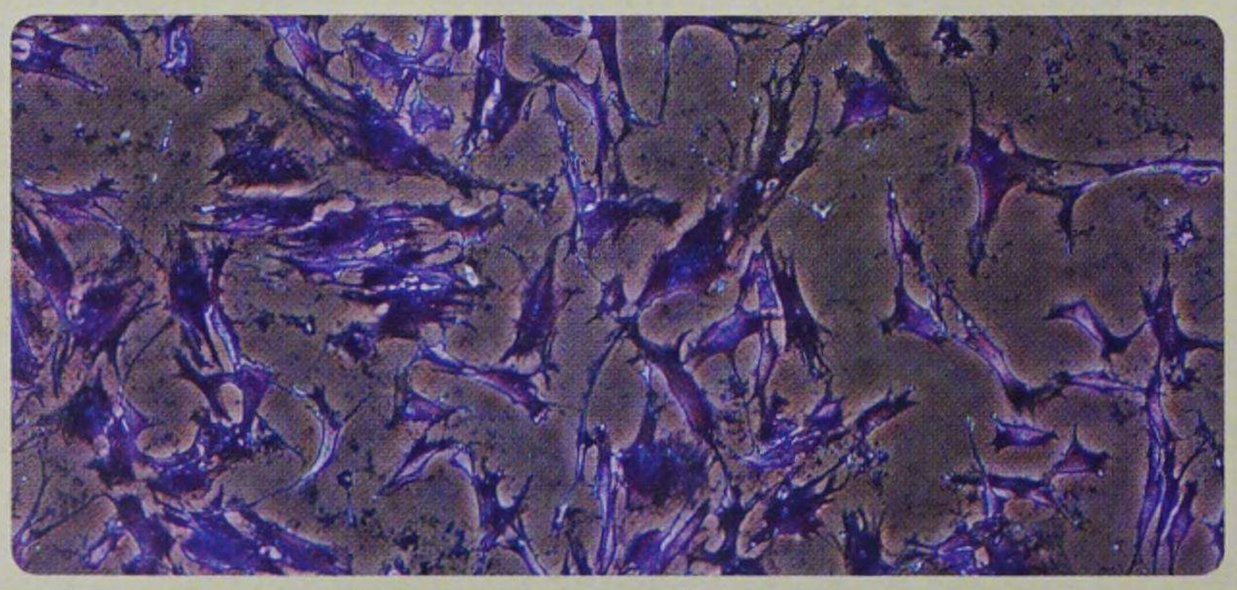
❷ Effectuez une recherche pour faire le point sur l'état de la recherche en matière de prothèses bioniques.

❸ Précisez quelles sont les limites biologiques et éthiques à l'utilisation des prothèses bioniques.

POUR EN SAVOIR PLUS

- www2.cnrs.fr/presse/journal/3977.htm www.ric.org/research/accomplishments/Bionic.aspx

ENQUÊTE — Les cellules souches : une promesse pour l'avenir ?



Cellules souches embryonnaires de souris.

Les cellules souches sont des cellules embryonnaires capables de se renouveler et de se différencier en une variété de types cellulaires différents, y compris des neurones. Les thérapies cellulaires visent à restaurer les fonctions d'un tissu ou d'un organe endommagé par greffe de cellules. Récemment, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine des cellules souches et pourraient trouver des applications en médecine régénérative.

ACTIVITÉS

❶ Expliquez le principe des thérapies cellulaires à partir d'un exemple.

❷ Expliquez quels espoirs suscitent les essais menés pour les patients atteints de maladies neurodégénératives.

❸ Précisez quels problèmes éthiques sont soulevés par les thérapies cellulaires utilisant les cellules souches embryonnaires.

❹ Indiquez quels intérêts présentent la dédifférenciation de cellules déjà différenciées

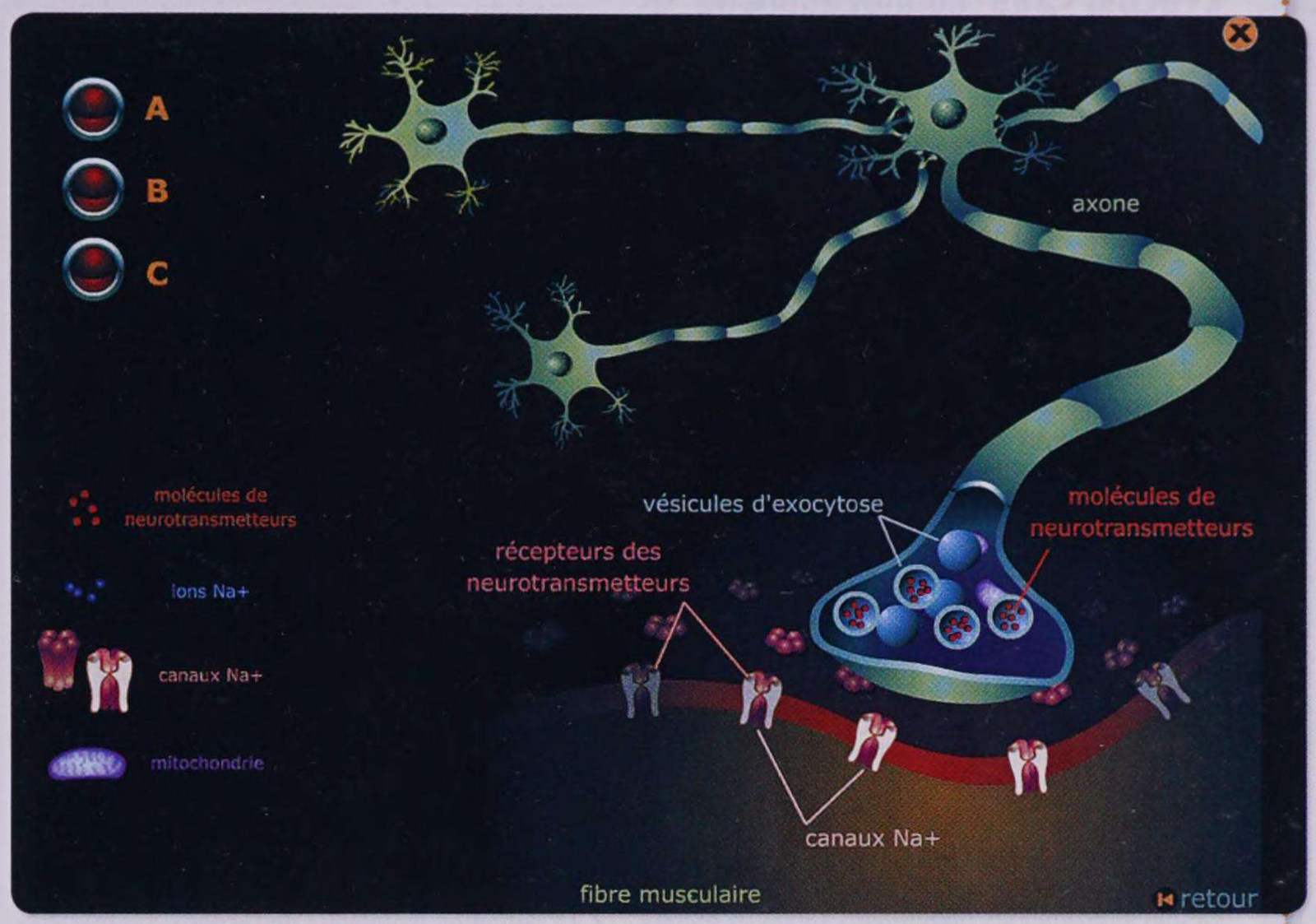
POUR VOUS GUIDER

- www.inserm/fr (tapez « cellules souches »)
- www.genopole.fr (tapez « cellules souches »)
- www.ccne-ethique.fr/

INFORMATIQUE — Le logiciel NERF

http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/lycee/perez/PP_logo/logiciels.htm

Le logiciel NERF permet d'approfondir plusieurs éléments relatifs à la physiologie nerveuse, comme la notion de potentiel d'action, le codage du message nerveux, le fonctionnement des synapses ou les propriétés d'intégration des neurones.

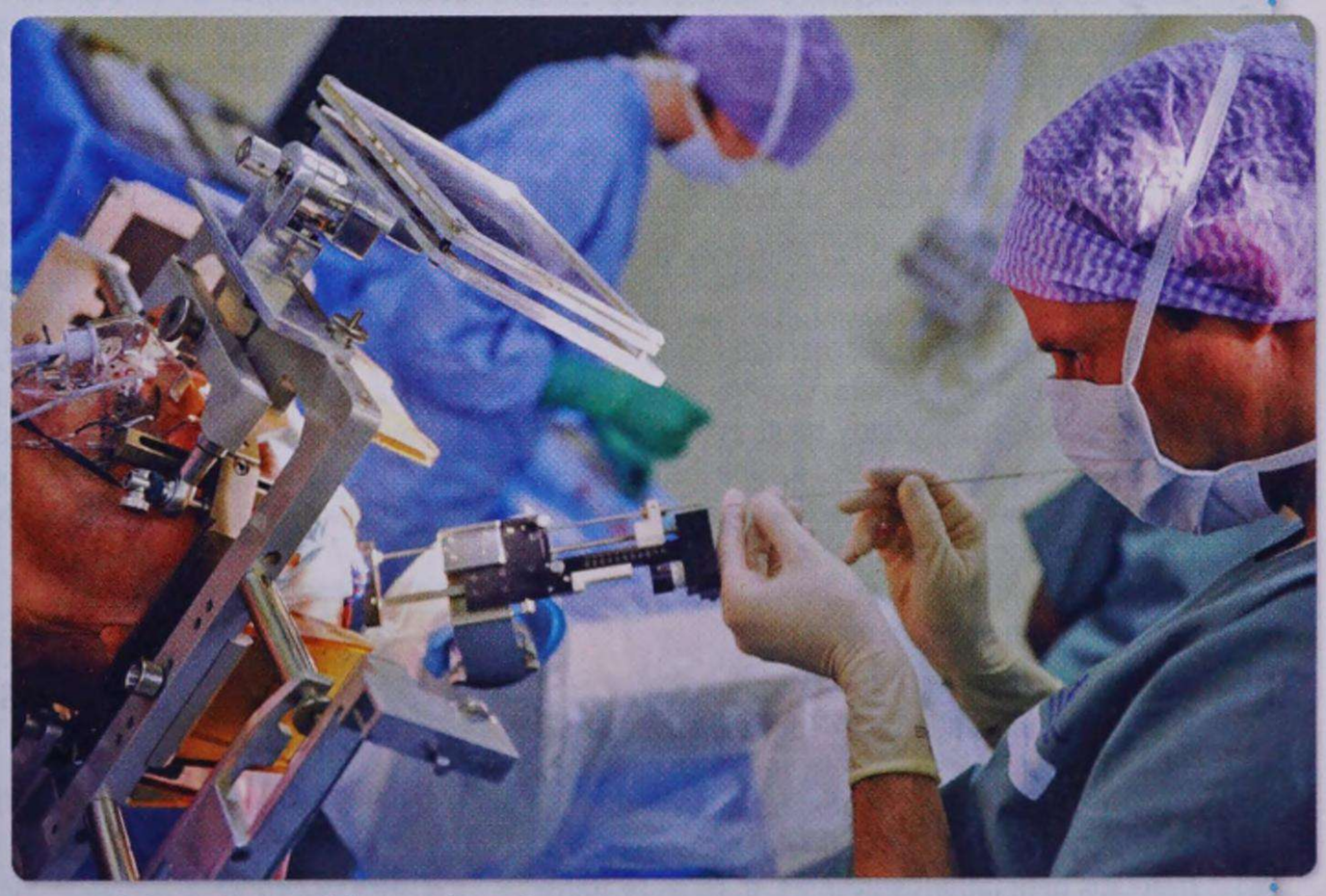


ACTIVITÉS

1. Dans la rubrique « potentiel d'action », comparez les effets d'une stimulation faible, moyenne ou forte.
2. Comparez les effets de stimulations d'intensités croissantes dans une fibre nerveuse (« codage dans une fibre ») et dans un nerf (« recrutement »).
3. Dans la rubrique « synapse », comparez les effets des trois stimulations A, B et C.

MÉTIER — Les métiers de la motricité

Les métiers liés à la motricité ont tous un rapport plus ou moins direct avec le fonctionnement du système nerveux, des muscles et du squelette. Ils font le plus souvent appel à un travail d'équipe, qui réunit des professions médicales et paramédicales. Neurologues, neurochirurgiens, psychomotriciens, kinésithérapeutes ou encore ergothérapeutes travaillent de concert dans l'intérêt des patients.



Neurochirurgien au bloc opératoire.

ACTIVITÉS

1. Identifiez le parcours universitaire et les qualités nécessaires à l'exercice de chacun des métiers cités
2. Rédigez une fiche métier sur le métier de votre choix.

POUR VOUS GUIDER

- www.metiers-fonctionpubliquehospitaliere.sante.gouv.fr
- www.onisep.fr

THÈME 1

CHAPITRE 1 (p. 36)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse a. **2.** Réponse b. **3.** Réponse a.

❷ Qui suis-je ?

Cellule 1 : 2n = 4 ; chromosomes à 2 chromatides.
Cellule 2 : n = 2 ; chromosomes à 2 chromatides.
Cellule 3 : 2n = 4 ; chromosomes à 1 chromatide.

❸ s'entraîner avec un exercice guidé

Croisement 1 : Les parents étant de lignée pure, ils sont homozygotes pour chacun des gènes étudiés. Chacun a transmis à ses descendants un allèle de chaque gène. Les individus F1 sont donc hétérozygotes pour les deux gènes étudiés. Or, seuls s'expriment dans leur phénotype les allèles « présence d'une tache colorée » (T) et « sabots fusionnés » (F). Ils sont donc dominants, respectivement, sur les allèles « coloration uniforme » (u) et « sabots normaux » (n).

Croisement 2 : Il s'agit d'un croisement-test. Le phénotype de la génération F'2 est le reflet direct du génotype des gamètes produits par F1.

Hypothèse 1 : Si les gènes sont situés sur le même chromosome, les individus F1 produisent 2 types de gamètes parentaux majoritaires, et 2 types de gamètes recombinés minoritaires (apparus grâce au brassage intrachromosomique). On devrait donc obtenir en F'2 une majorité de porcelets [u F] et [T n] (en proportions égales) et une minorité de porcelets [T F] et [u n] (en proportions égales).

Hypothèse 2 : Si les gènes sont situés sur des chromosomes différents, les individus F1 produisent 4 types de gamètes en proportions égales (grâce au brassage interchromosomique). On devrait donc obtenir en F'2 25 % de chacun des phénotypes de porcelets.

Les résultats expérimentaux montrent que l'on obtient 25 % [T n], 24 % [T F], 25 % [u n] et 26 % [u F]. L'hypothèse 2 est donc validée : les gènes sont situés sur des chromosomes différents.

CHAPITRE 2 (p. 54)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse a, b, c et d. **2.** Réponses a et d. **3.** Réponse b.

❷ Une phrase appropriée

a. L'association de génomes entre espèces différentes, par hybridation, peut être à l'origine de l'évolution des espèces. **b.** Une espèce peut acquérir de nouveaux caractères par intégration d'un gène d'une autre espèce. **c.** Les symbioses sont des associations sources de diversification du vivant sans modification des génomes.

❸ Vrai ou faux

a. Faux. Les innovations génétiques peuvent avoir différentes origines, dont le transfert de gènes ou l'association de génomes. **b.** Vrai. **c.** Faux. La diversification non génétique du vivant est transmise aux générations suivantes. **d.** Faux. Le transfert de gènes s'observe parfois entre espèces très éloignées d'un point de vue évolutif.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

On observe un génome de type bactérien dans le chloroplaste, un génome de type eucaryote entre les membranes du chloroplaste (dans le nucléomorphe) et un génome eucaryote complet dans le noyau de la cellule. On sait que le chloroplaste chez les plantes est issu d'une endosymbiose d'une cyanobactérie par une cellule eucaryote. Il possède deux membranes et un génome de type bactérien. Le chloroplaste des cryptophytes est plus complexe (deux membranes et un nucléomorphe supplémentaire). La présence des trois génomes différents suggère que trois cellules sont à l'origine de la cellule de cryptophyte. On peut donc faire l'hypothèse suivante : un premier eucaryote a acquis un chloroplaste (d'origine cyanobactérienne) par endosymbiose. Le noyau de cet eucaryote correspond au nucléomorphe des cryptophytes. Cet eucaryote a lui-même été intégré par endosymbiose à un deuxième eucaryote, dont le noyau correspond au vrai noyau actuel des cryptophytes. Finalement le chloroplaste des cryptophytes serait issu de deux endosymbioses successives, d'abord d'une cyanobactérie dans un eucaryote, puis de l'eucaryote qui a intégré cette cyanobactérie dans un autre eucaryote.

CHAPITRE 3 (p. 68)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponses a et d. **2.** Réponses b et d. **3.** Réponse a. **4.** Réponse a.

❷ Qui suis-je ?

a. La sélection naturelle. **b.** La dérive génétique. **c.** La définition biologique de l'espèce.

❸ Une phrase appropriée

a. La modification génétique progressive de deux populations différentes de la même espèce peut conduire à leur isolement reproducteur. **b.** L'isolement reproducteur empêche l'échange de gènes entre deux populations. **c.** La définition biologique de l'espèce est basée sur le critère d'interfécondité des individus.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

On constate que des espèces différentes de *Galéopsis* peuvent s'hybrider. Les hybrides sont quasiment stériles. Or la définition biologique de l'espèce stipule que des individus appartiennent à des espèces différentes si leur reproduction n'est pas possible ou donne des hybrides stériles. Les espèces parentes (*G. speciosa* et *G. pubescens*) sont donc bien deux espèces différentes. La faible fertilité de la F1 permet néanmoins d'obtenir une F2 triploïde (qui ne semble pas être une nouvelle espèce puisqu'elle peut s'hybrider avec des parents de la F0).

En revanche, en F3, le *G. tetrahit*, est bien une nouvelle espèce, il est fertile et il ne se reproduit pas avec les parents. Ce mode de spéciation s'appelle spéciation par hybridation-polyploïdisation (voir chapitre A2), il est fréquent chez les plantes.

CHAPITRE 4 (p. 90)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse c. **2.** Réponse c. **3.** Réponses a, b et c. **4.** Réponse c.

❷ Savez-vous ?

a. Au sein des primates, l'Homme appartient au groupe des grands primates (caractérisés par l'absence de queue). Parmi les grands primates actuels, les chimpanzés sont les plus proches parents de l'Homme. **b.** Un primate est un mammifère qui possède des mains (pieds) avec un pouce (gros orteil) opposable aux autres doigts, des ongles à la place des griffes, une vision stéréoscopique, un cerveau de grande taille proportionnellement au reste du corps. **c.** Les plus anciens représentants du genre *Homo*, apparaissent en Afrique vers – 2,5 Ma. Jusqu'à – 1,78 Ma, plusieurs espèces du genre *Homo* cohabitent en Afrique. À partir de – 1,78 Ma, les représentants du genre *Homo* connaissant une expansion importante en Europe et en Asie. *Homo sapiens* apparaît en Afrique vers – 195 000 ans et en Europe il y a 35 000 ans. Jusqu'à – 30 000 ans, les *Homo sapiens* coexistent avec d'autres espèces du genre *Homo*. **d.** Certains aspects du phénotype, comme la morphologie crânienne sont sous contrôle génétique. D'autres, comme par exemple la taille, dépendent de conditions de l'environnement comme la disponibilité de la ressource alimentaire. Chez les grands primates dont l'Homme, le phénotype comportemental comme le langage, ne peut s'acquérir qu'au contact des membres du groupe.

❸ s'entraîner avec un exercice guidé

Dans les populations actuelles d'Asie du sud-est, la fréquence de l'allèle *adh-b* varie géographiquement : elle est faible (entre 0 et 10 %) dans les régions situées à l'ouest, et augmente progressivement en allant vers l'est. C'est en Chine du sud que la fréquence de l'allèle est la plus élevée (90-100 %). Comment expliquer cette variation géographique de la fréquence de l'allèle *adh-b* ? On remarque que les plus anciens sites de cultures de riz, en particulier ceux datés de – 12 000 à – 6 000 ans, sont situés dans le sud de la Chine, là où aujourd'hui la fréquence de l'allèle *adh-b* est la plus élevée. On peut donc formuler l'hypothèse explicative suivante : il y a 12 000 ans, les groupes humains qui occupent les régions côtières commencent à domestiquer le riz. Les rares individus, qui à l'époque sont porteurs de l'allèle *adh-b*, sont avantagés car ils supportent mieux que les autres la nourriture fermentée produite à partir du riz. Chez eux, la mortalité est probablement plus faible car ils sont mieux nourris et ont donc une descendance plus nombreuse. En conséquence, la fréquence de l'allèle *adh-b* augmente progressivement dans les populations humaines qui cultivent le riz, mais pas ailleurs. Il s'agit d'un bel exemple d'évolution humaine (modification de la fréquence d'un allèle) influencée par l'activité culturelle (pratique agriculturale).

THÈME 2

CHAPITRE 1 (p. 112)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse b. **2.** Réponse c. **3.** Réponses a et c.

❷ Qui suis-je ?

a. Un stomate. **b.** Un poil absorbant. **c.** Un vaisseau du xylème.

❸ Schéma à compléter

a. Bourgeon terminal. **b.** Tige. **c.** Bourgeon axillaire. **d.** Limbe. **e.** Pétiole. **f.** Nervures. **g.** Feuille

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

La coupe de laurier rose permet d'observer différentes structures d'échange : des stomates, placés au fond des cryptes pilifères ; une cuticule, recouvrant un épiderme supérieur épais (constitué de plusieurs couches de cellules) et un épiderme inférieur épais constitué de plusieurs couches de cellules. De manière générale, les pertes d'eau

au niveau des feuilles se font par transpiration. La transpiration s'effectue en partie à travers la cuticule épidermique (transpiration cuticulaire) et majoritairement à travers les stomates (transpiration stomatique). Dans le cas du laurier rose, on observe que les stomates sont abrités au fond de cryptes, à l'abri des courants d'air desséchants. De plus, les poils limitent les mouvements d'air dans ces cryptes. La cuticule épaisse limite l'évaporation sur la face supérieure de la feuille, de même que les épidermes épais, sur les deux faces. Ces différentes particularités structurales permettent donc de limiter la déshydratation.

CHAPITRE 2 (p. 130)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse d. **2.** Réponses b et d. **3.** Réponse c.

2 Vrai ou faux ?

a. Vrai. **b.** Faux. La dispersion des graines peut se faire grâce au vent ou grâce à la plante elle-même (balistique). **c.** Faux. La mise en place des pièces florales est contrôlée par les gènes du développement. **d.** Faux. Chez les plantes à fleurs, l'apparition d'un fruit ne se fait que s'il y a eu pollinisation et fécondation.

3 Schéma à compléter

Titre : diagramme floral. **1.** Sépale. **2.** Pétale. **3.** Étamine. **4.** Ovaire.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

Lorsque les ovules sont en place (courbe 1, courbe témoin), l'enveloppe grandit de 20 à 55 mm du 2e au 7e jour après la fécondation. En revanche, lorsque les ovules sont enlevés (courbe 2), l'enveloppe ne se développe que très peu et ne dépasse pas 25 mm. La croissance de l'enveloppe est rétablie partiellement en présence d'auxine (courbe 3, elle atteint 50 mm) et complètement en présence d'auxine et de gibbérelline (courbe 4). L'association des deux hormones végétales permet donc le développement et la croissance de l'ovaire (enveloppe), même en absence des ovules. Après la fécondation, l'ovaire se transforme en fruit et chaque ovule se transforme en graine. Ces expériences permettent donc de formuler l'hypothèse que, suite à la fécondation, les ovules, puis les graines, produisent deux hormones : auxine et gibbérelline. Ce sont ces hormones produites par la graine qui permettent la transformation de l'ovaire en fruit et l'élongation du fruit. Des expériences de dosage de l'auxine et de la gibbérelline dans les graines (pour vérifier l'augmentation de leur production suite à la fécondation) pourraient permettre de valider cette hypothèse.

THÈME 3

CHAPITRE 1 (p. 160)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse c. **2.** Réponses b, c et d. **3.** Réponses b et c.

2 Définition

Voir dico des SVT page 370.

3 Qui suis-je ?

a. La droite isochrone. **b.** L'équilibre isostatique. **c.** La racine crustale.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

1. Deux colonnes sont en équilibre isostatique lorsqu'elles exercent la même pression sur le manteau sous-jacent, ce qui implique que leur masse est égale. On compare une croûte continentale épaissie correspondant à la chaîne de montagnes avec une croûte continentale d'altitude nulle : la première est figurée au centre du schéma, la seconde est la situation représentée à droite ou à gauche de la chaîne de montagnes. La profondeur au niveau de laquelle l'équilibre isostatique est réalisé est représentée par la droite horizontale rouge (en dessous, le manteau est homogène). Si on désigne H l'épaisseur de la croûte continentale dont l'altitude est nulle (H = 28 km) et R l'épaisseur de la croûte continentale en dessous de H, on peut écrire :

Masse de la colonne d'altitude nulle :

$M_0 = d_{cc} H + d_{ml} R$

Masse de la colonne d'altitude h :

$M_h = d_{cc} (h + H + R)$

D'où : $d_{cc} H + d_{ml} R = d_{cc} (h + H + R)$

$R (d_{ml} - d_{cc}) = d_{cc} h$

$R = h\, d_{cc} / (d_{ml} - d_{cc})$

Application numérique :

$R = 3 \times 2{,}8 / (3{,}3 - 2{,}8) = 16{,}8$ km

L'épaisseur totale de la croûte E est alors : E = h + H + R = 3 + 30 + 16,8 = 49,8 km, le Moho est donc situé à 49,8 km sous le sommet, soit à une profondeur de 46,8 km par rapport à l'altitude 0 de référence.

2. Si on ajoute sur cette montagne un glacier de 1 km d'épaisseur, alors l'égalité des masses des deux colonnes considérées devient :

$d_{cc} H + d_{ml} R' = d_{cc} (h + H + R') + d_{glace}$

$R' (d_{ml} - d_{cc}) = d_{cc} h + d_{glace}$

$R' = (d_{cc} h + d_{glace}) / (d_{ml} - d_{cc})$

Application numérique : $R' = (3 \times 2{,}8 + 0{,}9) / (3{,}3 - 2{,}8) = 18{,}6$ km

L'épaisseur totale de la croûte E' est alors : E' = h + H + R' = 3 + 30 + 18,6 = 51,6 km, le Moho est donc situé à 51,6 km sous le sommet, soit à une profondeur de 48,6 km par rapport à l'altitude 0 de référence.

CHAPITRE 2 (p. 178)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse b. **2.** Réponse b. **3.** Réponses c et d.

2 Vrai ou faux ?

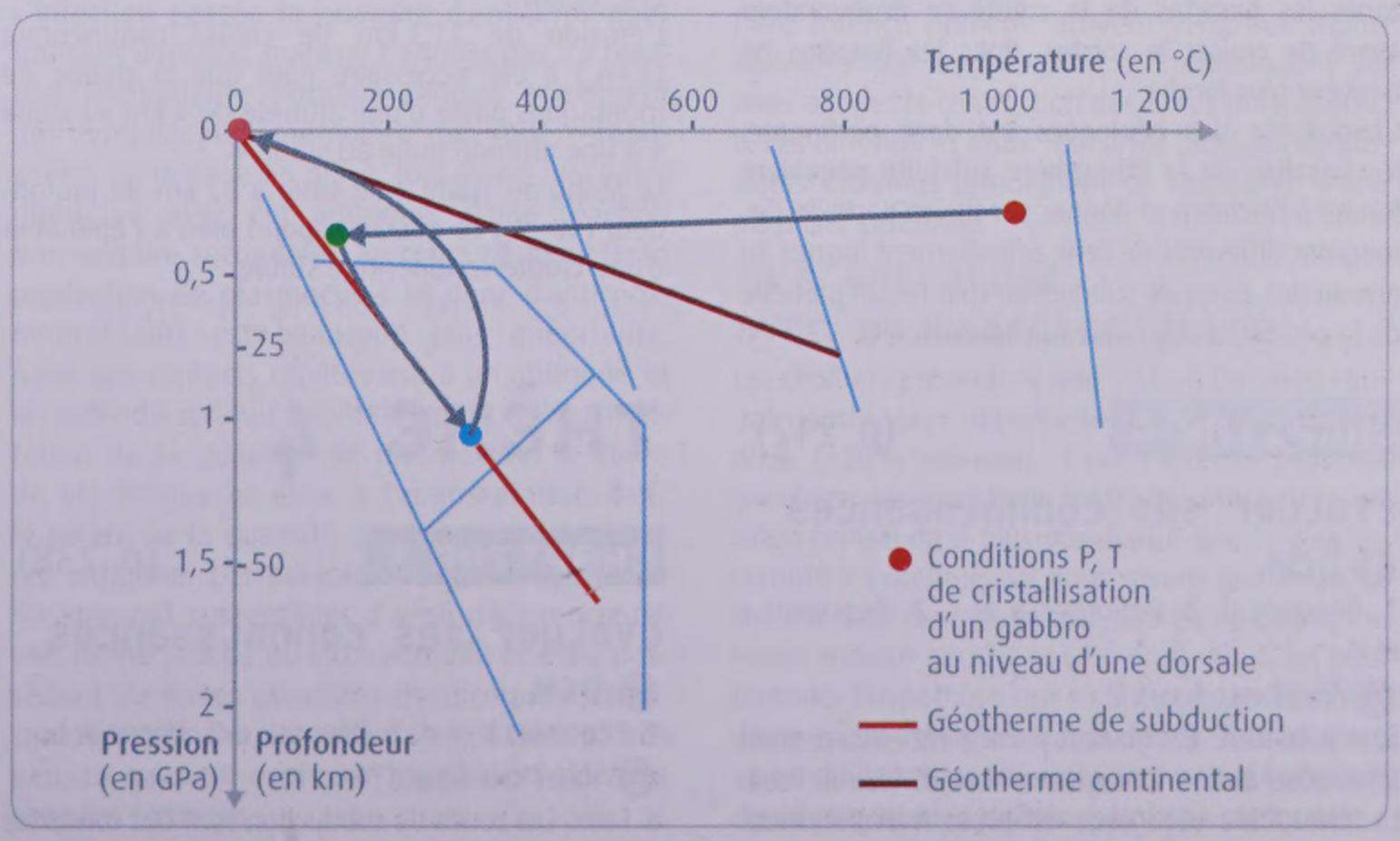
a. Faux. Lors d'une collision les marges continentales sont déformées. **b.** Vrai. **c.** Faux. Lorsque deux lithosphères continentales s'affrontent, l'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire.

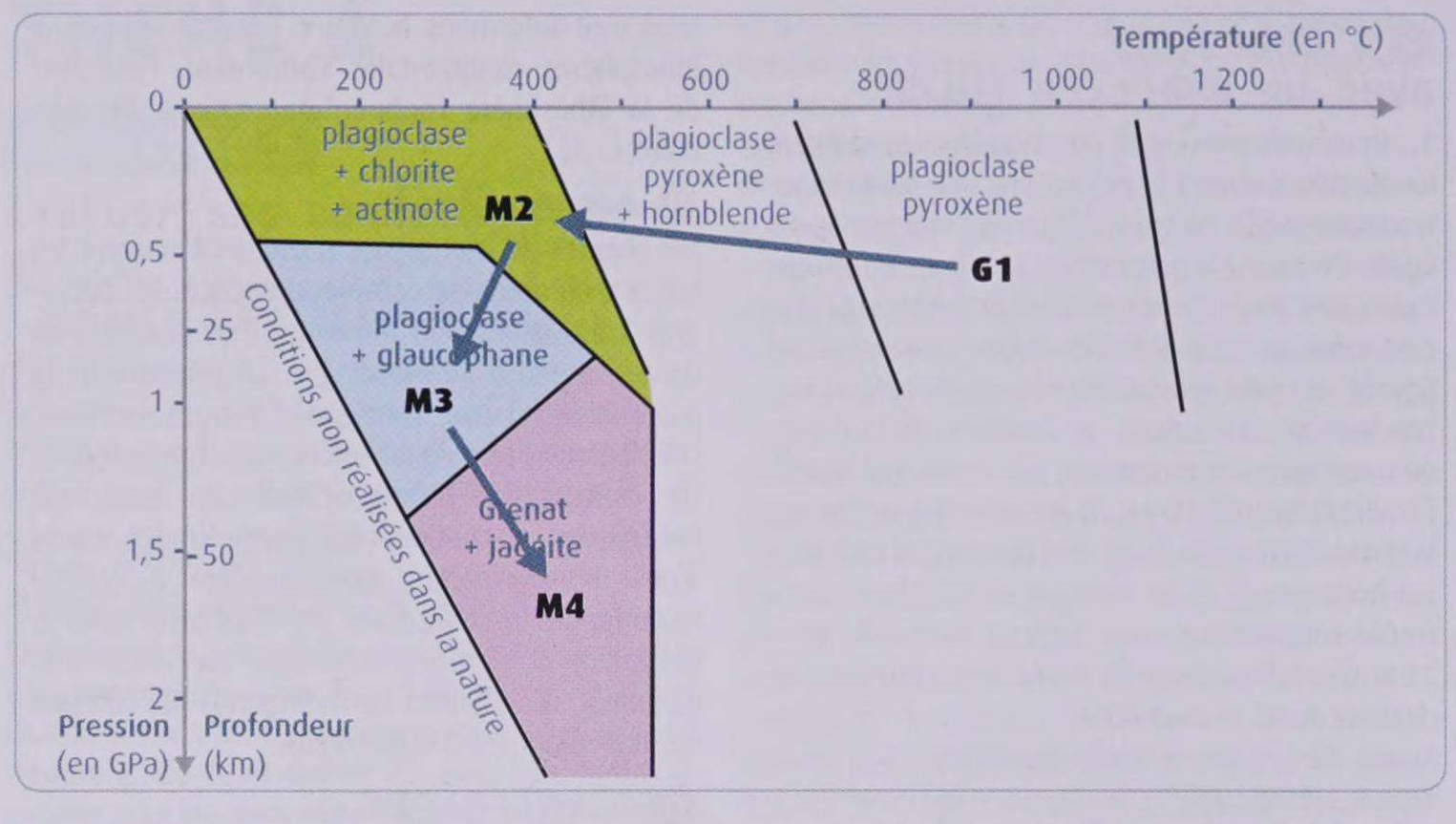
3 Argumentez

Les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'un domaine océanique disparu : les ophiolites. Leur localisation témoigne d'un phénomène de convergence lithosphérique. La présence et la localisation relative d'anciennes marges continentales passives témoignent elles aussi d'un processus de convergence lithosphérique. Les matériaux océaniques et continentaux montrent les traces d'une transformation minéralogique à grande profondeur : la subduction est impliquée dans la disparition du domaine océanique qui conduit à la formation des chaînes de montagnes par collision de deux plaques lithosphériques.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

Le pyroxène et le plagioclase sont les minéraux de la roche initiale ; l'actinote et le glaucophane sont des minéraux issus du métamorphisme. Les premières conditions rencontrées sont celles de la mise en place d'un gabbro au niveau d'une dorsale, elles sont figurées par un point rouge sur le graphique. Le gabbro a rencontré des conditions permettant la formation d'actinote (point vert, voir graphique ci-dessous), celles permettant la formation de glaucophane (point bleu), et il a été échantillonné aujourd'hui en surface (point rose). La chronologie d'apparition des minéraux est donnée par leurs relations géométriques, qui indiquent l'ordre suivant : pyroxène (et plagioclase) puis actinote puis glaucophane. Il faut donc relier les point correspondants dans cet ordre, en partant des conditions de mise en place du gabbro, et en terminant par les conditions dans lesquelles l'échantillon a été récolté. Plusieurs façons de relier les points existent, mais il est cohérent de suivre l'évolution des conditions P, T décrites par le géotherme de subduction pour la phase correspondante, le géotherme continental pour la partie finale du trajet qui ramène l'échantillon en surface (les mécanismes d'exhumation ne sont pas précisément connus, mais le lambeau de croûte océanique suit alors le même trajet que les unités de croûte continentale qui l'environnent). Les phases de l'histoire de la croûte océanique sont donc : expansion océanique et vieillissement de la croûte océanique, disparition de l'océan par subduction (puis exhumation).





CHAPITRE 3 (p. 196)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse c. **2.** Réponses a et d.

2 Un graphique à compléter

Voir schéma ci-dessus.

3 s'entraîner avec un exercice guidé

Les matériaux présents dans une zone de subduction et pouvant être à l'origine de magmas différents de celui des zones de subduction actuelle sont les basaltes formant la croûte de la lithosphère en subduction. Pour la courbe de fusion d'un basalte hydraté (courbe rouge): tout point situé à droite de la courbe correspond à des conditions de pression et température pour lesquelles un basalte hydraté peut fondre. Pour la courbe de déshydratation d'un basalte (courbe bleue): tout point situé à droite de cette courbe correspond à un basalte déshydraté. Les conditions permettant une fusion partielle d'un basalte hydraté correspondent au domaine dans lequel les conditions «basalte hydraté» et «pression et température permettant la fusion partielle» sont toutes deux remplies. Les flèches bleues indiquent les conditions de pression et température rencontrées dans une zone de subduction:

- à l'archéen, la flèche bleue traverse la zone précédemment identifiée comme réunissant les conditions d'une fusion partielle (basaltes encore hydratés lorsque le solidus est franchi): la fusion partielle des basaltes était possible;
- actuellement, la flèche bleue ne traverse pas cette zone: les basaltes de la croûte se déshydratent avant de croiser le solidus, donc les basaltes ne peuvent plus fondre.

L'hypothèse des géologues est donc pertinente, les basaltes de la lithosphère subduite pouvaient fondre à l'archéen et donner par fusion partielle des magmas différents de ceux actuellement formés au niveau des zones de subduction (par fusion partielle de la péridotite du manteau chevauchant).

CHAPITRE 4 (p. 212)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse d. **2.** Réponses a et c. **3.** Réponses c et d.

2 Vrai ou faux?

a. Vrai. **b.** Faux. Les glaciers participent efficacement à l'érosion de la montagne. **c.** Vrai. **d.** Vrai. **e.** Faux. La lithosphère océanique est presque entièrement recyclée dans le manteau asthénosphérique par subduction, la lithosphère continentale est essentiellement recyclée par des processus tectoniques, sédimentaires, magmatiques et métamorphiques, lors des orogenèses successives.

3 Qui suis-je?

a. L'eau. **b.** La lithosphère continentale ou croûte continentale.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

1. On considère que les stades 1, 3 et 4 sont caractérisés par un équilibre isostatique, alors qu'au stade 2, la chaîne de montagnes n'est pas à l'équilibre isostatique. Or les densités moyennes de n'importe quelles colonnes de matériaux en équilibre sont identiques au niveau de la surface de compensation. Donc $D_1=D_3=D_4 \neq D_2$.

$D_1 = \rho_{cc} \times (A_1 + R_1)$

$D_3 = \rho_{cc} \times (R_3 + A_3) + \rho_{ml} \times Z_3$

Or

$R_3 + A_3 = R_1$

Donc $D_3 = \rho_{cc} \times R_1 + \rho_{ml} \times Z_3$

Puisque $D_1 = D_3$, alors:

$\rho_{cc} \times (A_1 + R_1) = \rho_{cc} \times R_1 + \rho_{ml} \times Z_3$

$Z_3 = \rho_{cc} \times A_1 / \rho_{ml}$

$Z_3 = 3{,}3$ km

Au stade 3 après 4 km d'érosion de croûte continentale et rééquilibrage isostatique, l'altitude de la chaîne de montagnes est de 3,3 km.

2. $D_4 = \rho_{cc} \times R_4 + \rho_{ml} \times Z_4$

Or $R_1 = R_4 + Z_4$

Donc $\rho_{cc} \times (R_1 - Z_4) + \rho_{ml} \times Z_4$

Puisque $D_1 = D_4$, alors

$\rho_{cc} \times (A_1 + R_1) = \rho_{cc} \times (R_1 - Z_4) + \rho_{ml} \times Z_4$

$Z_4 = \rho_{cc} \times A_1 / (\rho_{ml} - \rho_{cc})$

$Z_4 = 18$ km

L'érosion de 21,3 km de croûte continentale (Z_4+A_3) a été nécessaire pour que la chaîne de montagnes passe d'une altitude de 4 km au stade 1 à une altitude nulle au stade 4.

Le Moho au stade 4 se situe à 32 km de profondeur ($50 - Z_4$) ce qui correspond bien à l'épaisseur d'une croûte continentale stable.

THÈME 4

CHAPITRE 1 (p. 238)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponses b et d. **2.** Réponse c. **3.** Réponse b.

2 Vrai ou faux?

a. Faux. Les zones de subduction sont des contextes favorables à l'exploitation géothermique, car le flux géothermique y est localement fort (magmatisme). **b.** Faux. Les dorsales, caractérisées par un fort flux géothermique, ne sont pas propices à l'exploitation géothermique quand elles sont immergées (en très grande majorité). **c.** Vrai.

3 Une phrase appropriée

a. Le magmatisme dans les zones de subduction génère un gradient géothermique supérieur à 30 °C.km^{-1}. **b.** L'énergie géothermique est dissipée vers la surface selon deux modes de transfert: par conduction et par convection, plus efficace.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

Le gradient géothermique dans ce forage est de 65 °C.km^{-1} (130/2), soit le double du gradient moyen sous les continents. De plus, la présence de zones très fracturées indique que la roche est perméable à l'eau. Or l'eau est un agent d'altération. Ainsi, pour localiser les fluides à extraire, il faut repérer parmi ces réseaux de fractures, ceux dont la roche granitique est altérée. Dans ce forage, il y a 3 zones à exploiter, conjuguant forte densité des fractures et forte altération du granite: entre 1400 et 1500 m, vers 1630 m et 2070 m de profondeur.

CHAPITRE 2 (p. 256)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse b. **2.** Réponse a. **3.** Réponses a et c. **4.** Réponses b et c.

2 Qui suis-je?

a. Le syndrome de domestication. **b.** Un transgène. **c.** *Agrobacterium*.

3 Une phrase appropriée

a. La domestication est une conséquence de la sélection artificielle exercée sur une plante sauvage. **b.** La biodiversité cultivée est un réservoir de caractères utiles à l'amélioration des plantes. **c.** Le génie génétique permet l'insertion d'un gène étranger qui apportera un caractère nouveau à la plante.

4 s'entraîner avec un exercice guidé

A partir de maïs contenant approximativement les mêmes quantités d'huile (5%), on constate qu'au fil des générations les chercheurs ont isolé deux lignées: une lignée riche en huile qui atteint près de 20% d'huile à la 80ème génération et une lignée pauvre en huile (près de 0% à la 80ème génération). Pour cela les chercheurs ont sélectionnés à chaque génération les individus qui avait le caractère phénotypique recherchée pour la lignée correspondante: soit richesse en huile, soit pauvreté en huile. Ils ont effectué une sélection phénotypique. Dans cas d'une lignée pure, tous les individus auraient possédé la même teneur en huile, la sélection aurait donc été impossible. Le caractère «teneur en huile» est héritable et variable d'un individu à l'autre, cette sélection phénotypique permet donc une évolution du caractère.

THÈME 5

CHAPITRE 1 (p. 280)

évaluer ses connaissances

1 QCM

1. Réponse b. **2.** Réponse c. **3.** Réponse b.

❷ Qui sommes-nous ?

a. les cellules sentinelles. **b.** les médiateurs de l'inflammation.

❸ Vrai ou faux ?

a. Faux. En l'absence d'infection une partie des cellules de l'immunité innée est présente dans les tissus (cellules sentinelles) ; d'autres cellules sont présentes dans le compartiment sanguin. **b.** Faux. Au terme de la réaction inflammatoire, certaines des cellules sentinelles, se déplacent en direction des ganglions lymphatiques où elles assurent la présentation de l'antigène aux cellules impliquées dans la réaction immunitaire adaptative. **c.** Faux. L'immunité innée est présente dès la naissance.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

Les vrais jumeaux (ou jumeaux monozygotes) sont issus d'une cellule œuf unique qui, après quelques divisions a donné naissance à deux embryons. Le patrimoine génétique des deux embryons est donc strictement identique. A l'inverse, les faux jumeaux (ou jumeaux dizygotes) sont issus de deux cellules œufs distinctes elles-mêmes obtenues par deux fécondations différentes. Leurs patrimoines génétiques sont donc différents. L'étude des vrais jumeaux permet donc de connaître l'influence d'un même patrimoine génétique sur un phénomène donné : ici la production d'IL1-β. Les graphiques proposés permettent de comparer la concentration d'IL1-Ð produite par deux individus en réponse à la présence d'un déterminant antigénique. Plus les réactions des deux individus sont proches, plus les points du graphique doivent se rapprocher de la droite y = x, donc plus la dispersion des points (mesurée par la valeur I_d) doit être faible. S'il existe un déterminisme génétique de la réponse innée, l'indice de dispersion doit être plus faible dans le cas de vrais jumeaux que de faux jumeaux. Les valeurs obtenues pour I_d sont respectivement de 560 pour une paire de vrais jumeaux et de 2 720 pour une paire de faux jumeaux. Ceci confirme donc l'hypothèse d'un déterminisme génétique des mécanismes de l'immunité innée.

CHAPITRE 2 (p. 302)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponses a et b. **2.** Réponse c. **3.** Réponses a, c et d.

❷ Une phrase appropriée

a. La fixation des anticorps sur leur antigène par leurs régions variables conduit à la formation d'un complexe immun. **b.** La sélection des lymphocytes T CD4 par reconnaissance d'antigènes viraux conduit à leur amplification puis différenciation en lymphocytes T auxiliaires. **c.** La coopération entre réponse innée et réponse adaptative permet l'élimination de l'agent infectieux.

❸ Schéma à compléter

1. Chaîne légère. **2.** Chaîne lourde. **3.** Partie reconnue par les récepteurs membranaires des cellules phagocytaires. **4.** Partie variable. **5.** Partie constante.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

1. Le premier histogramme montre une augmentation du nombre de lymphocytes marqués durant les premiers 6 jours après infection (multiplication par un facteur 10 en 4 jours), suivie d'une baisse de ce nombre : il y a donc eu multiplication cellulaire des lymphocytes CD4 naïfs initialement injectés. Le second histogramme montre que les lymphocytes marqués produisent de l'IL2, surtout au 6ème jour après infection (production 20 fois plus importante qu'au 4ème jour). Or l'IL2 est produite par les lymphocytes auxiliaires après différenciation des lymphocytes CD4 suite à la rencontre avec l'antigène (présenté par une cellule dendritique). Nous pouvons donc conclure que les lymphocytes CD4 spécifiques du virus grippal ont rencontré leur antigène (début de processus de sélection) ce qui leur a permis de se multiplier et de se différencier en lymphocytes auxiliaires.

2. Nous savons que les lymphocytes T auxiliaires issus de la différenciation des lymphocytes CD4 favorisent l'activation d'autres lymphocytes effecteurs de la réponse immunitaire adaptative (plasmocytes et lymphocytes T cytotoxiques) et permettent ainsi d'éliminer respectivement les virus circulants et les cellules infectées.

CHAPITRE 3 (p. 316)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse b. **2.** Réponse b. **3.** Réponse c. **4.** Réponse c.

❷ Une phrase appropriée

a. La réponse immunitaire secondaire est une réponse plus efficace et plus rapide que la réponse primaire. **b.** L'injection d'un vaccin permet, lors d'une rencontre avec l'agent pathogène correspondant, de déclencher une réaction immunitaire secondaire. **c.** Les adjuvants contenus dans les vaccins conçus à partir de pathogènes non vivants favorisent la présentation des antigènes.

❸ Un document à compléter

Principes actifs ; adjuvant.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

Cet histogramme nous présente la quantité d'anticorps neutralisant les virus H1N1 chez un individu en fonction de son âge. Plus la personne à qui le sérum a été prélevé est âgée, plus la quantité d'anticorps est grande. Lors d'un contact avec un antigène la réaction immunitaire primaire qui se déclenche conduit à la production d'anticorps neutralisant cet antigène. Ils sont produits par des plasmocytes dont certains possèdent une durée de vie très longue. L'infection passée la quantité d'anticorps neutralisant diminue, mais ne s'annule pas. La réaction immunitaire primaire produit également des lymphocytes mémoires qui sont responsables de la mise en place, lors d'une rencontre ultérieure avec cet antigène, d'une réaction immunitaire secondaire, au cours de laquelle la production de plasmocytes et donc d'anticorps neutralisants est beaucoup plus importante. Ainsi des contacts répétés entre un antigène et un individu conduit inévitablement à l'augmentation de la quantité de plasmocytes à durée de vie longue et donc à l'augmentation dans le sérum de la quantité d'anticorps neutralisant cet antigène. Les personnes âgées de plus de 60 ans sont susceptibles d'avoir déjà rencontré une forme proche du virus actuelle et donc possèdent de fortes quantités d'anticorps neutralisant. En revanche, les enfants en possèdent très peu, ce qui peut expliquer l'agressivité du virus chez les enfants.

THÈME 6

CHAPITRE 1 (p. 342)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse c. 2. Réponse c. 3. Réponses a et c. 4. Réponses b et c.

❷ Une phrase appropriée

a. Le message nerveux est codé en fréquence le long des motoneurones puis en concentration de neurotransmetteur au niveau de la plaque motrice.

b. L'arc réflexe débute au niveau du fuseau neuro-musculaire, il remonte ensuite jusqu'à la moelle épinière pour redescendre vers la plaque motrice et déclencher une contraction du muscle.

❸ Schéma à compléter

a. dendrite ; b. corps cellulaire ; c. noyau ; d. axone ; e. terminaison axonale.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

Le potentiel d'action est le signal élémentaire du message nerveux. On remarque que l'augmentation du stimulus visuel ne change pas les caractéristiques des potentiels d'action du neurone photosensible de la limule mais leur nombre par unité de temps. La propriété universelle du message nerveux mise en évidence par cette expérience est donc le codage électrique de l'information en fréquence de potentiels d'action identiques.

CHAPITRE 2 (p. 358)

évaluer ses connaissances

❶ QCM

1. Réponse c. 2. Réponse c. 3. Réponse b. 4. Réponses a et b.

❷ Vrai ou faux ?

a. Faux. L'aire motrice primaire est divisée en zone dont la surface n'a aucun rapport avec la surface du corps contrôlé.

c. Faux. Les lésions de la moelle épinière peuvent à la fois avoir des effets sur les mouvements réflexes et les mouvements volontaires.

d. Faux. Le cortex préfrontal est impliqué dans l'élaboration des intentions motrices.

❸ Une phrase appropriée

a. Les messages nerveux élaborés au niveau de l'aire motrice primaire arrivent jusqu'aux motoneurones qui les intègrent et commandent via leurs axones la contraction des fibres musculaires.

b. Les différences entre les cartes motrices de plusieurs individus témoignent de l'existence d'une plasticité cérébrale.

❹ s'entraîner avec un exercice guidé

Les droitiers présentent une surface de sillon central gauche plus importante que le sillon central droit (+20 % environ). C'est l'inverse pour les gauchers. Les gauchers contrariés présentent un sillon central droit plus développé que le gauche, comme les droitiers. Or nous savons que le cortex moteur droit contrôle le côté gauche du corps et le cortex moteur gauche le côté droit. Ainsi, on peut formuler l'hypothèse que c'est l'usage préférentiel d'une main d'un côté donné depuis l'enfance qui va conditionner les habiletés motrices et la surface du sillon central mobilisée (plasticité cérébrale).

LE DICO DES SVT

A

Acétylcholine: neuromédiateur produit et libéré au niveau des synapses neuromusculaires. Sa fixation sur la membrane musculaire provoque la naissance du potentiel d'action musculaire.

Adjuvant: substance augmentant le pouvoir immunogène des antigènes contenus dans un vaccin.

Agent infectieux: microorganisme (bactérie, eucaryote unicellulaire et champignon) ou virus qui provoque une maladie (infection).

Agrosystème: écosystème aménagé et géré par l'Homme afin d'y produire des matières animales ou végétales à des fins alimentaires, industrielles ou énergétiques (agrocarburants).

Aire motrice: région localisée du cortex cérébral (zone de faible épaisseur recouvrant la totalité du cerveau) qui participe à la planification, au contrôle et à l'exécution des mouvements volontaires. L'ensemble des aires motrices forme le cortex moteur.

Aire motrice primaire: aire fonctionnelle du cortex cérébral qui commande l'exécution des mouvements volontaires.

Allèle dominant: version d'un gène qui s'exprime toujours au niveau du phénotype.

Allèle récessif: version d'un gène qui ne s'exprime au niveau du phénotype que s'il est présent en deux exemplaires dans le génotype (état homozygote).

Allèles: versions d'un même gène. Les allèles diffèrent entre eux par des mutations.

Altération: modification chimique ou physique d'une roche sous l'action d'un agent naturel de surface comme l'eau.

Ancêtre commun: entité placée au nœud d'un arbre phylogénétique. Un ancêtre commun ne correspond pas à une espèce fossile identifiée: on ne connaît de lui que les caractères communs qu'il a transmis aux espèces situées au bout des branches partant du nœud considéré.

Andésite: roche volcanique microlithique caractéristique des zones de subduction. Elle est constituée de plagioclase de pyroxène et de minéraux hydroxylés (biotite et amphibole).

Antibiotique: molécule médicamenteuse qui empêche le développement de certaines bactéries.

Anticorps: protéine sécrétée par les plasmocytes et se liant spécifiquement à un antigène.

Antigène: molécule ou fragment de molécule pouvant déclencher une réaction immunitaire adaptative.

Arborescent: relatif à l'arbre.

Arbre de parenté: mode de représentation des liens de parenté entre plusieurs espèces. Chaque espèce, qu'elle soit actuelle ou fossile, est placée au bout d'une branche. Le point d'où partent plusieurs branches est appelé «nœud». Chaque nœud correspond à un ancêtre commun aux espèces situées au bout des branches raccordées à ce nœud.

Arbustif: relatif aux arbustes.

Arc réflexe: ensemble des éléments permettant la réalisation d'un réflexe: récepteur, message nerveux sensoriel véhiculé par un (des) neurone(s) sensoriel(s), centre nerveux, message nerveux moteur véhiculé par un (des) neurone(s) moteur(s), effecteur.

ARN: acide ribonucléique. Molécule simple brin formée d'un enchaînement de ribonucléotides (A, U, C ou G).

ARN messager (ARNm): molécule d'ARN issu de la transcription d'un gène.

Asthénosphère: enveloppe du globe située dans le manteau et sous la lithosphère. Sa limite supérieure est l'isotherme 1300 °C.

Axone: prolongement issu du corps cellulaire d'un neurone et s'achevant au niveau d'une synapse.

B

Bassin sédimentaire: dépression de la croûte terrestre, située sur un continent ou à sa bordure, où s'accumulent des sédiments.

Bathymétrie: profondeur des fonds marins.

Biodiversité: diversité du monde vivant. Elle se définit à trois échelles: biodiversité des écosystèmes, biodiversité des espèces et biodiversité génétique.

Biodiversité cultivée (ou domestique): biodiversité des plantes cultivées et des animaux domestiqués. On distingue trois niveaux de diversité. La diversité interspécifique est la diversité des espèces domestiquées et cultivées par l'homme. La diversité intraspécifique recouvre les différentes variétés au sein d'une même espèce (diversité des variétés de pomme, par exemple). Enfin la diversité intravariétale qualifie la diversité à l'intérieur d'une même variété, entre les individus qui la composent.

Biosphère: ensemble des milieux où se trouvent des êtres vivants.

Bourgeon: organe végétal situé sur les tiges et à l'origine de la construction d'une pousse (de branche, de feuille ou de fleur). Il peut être placé sur des tiges aériennes ou souterraines (bulbe, rhizome, etc.).

Brassage interchromosomique: apparition de nouvelles combinaisons de chromosomes (et donc d'allèles situés sur ces différents chromosomes) dans les cellules-filles au cours de la méiose.

Brassage intrachromosomique: apparition de nouvelles combinaisons des allèles des gènes situés sur le même chromosome.

C

Caractère dérivé: innovation évolutive dérivant d'un caractère ancestral.

Carte motrice: ensemble des régions du cortex moteur qui sont activées lors de la réalisation d'un mouvement volontaire donné.

Caryotype: ensemble des chromosomes d'une cellule.

Cellules germinales: ensemble des gamètes et des cellules à l'origine des gamètes.

Cellules dendritiques: cellules phagocytaires présentes partout dans l'organisme. Elles sont activées en présence de certains organismes infectieux et migrent dans les organes lymphoïdes périphériques où elles activent les lymphocytes.

Cellules présentatrices de l'antigène: cellules capables d'associer des fragments peptidiques antigéniques à des molécules du CMH et de les présenter à leur surface cellulaire pouvant provoquer ainsi l'activation des lymphocytes T. Les principales cellules présentatrices de l'antigène sont les macrophages, les cellules dendritiques et les lymphocytes B.

Cellules sentinelles: cellules immunitaires résidant en permanence dans les tissus et assurant la reconnaissance initiale des agents infectieux et le déclenchement de la réaction inflammatoire aiguë.

Cellules somatiques: toutes les cellules du corps à l'exclusion des cellules germinales. .

Cellulose: glucide constitutif des parois des cellules végétales.

Centre nerveux: organe du système nerveux où parviennent les voies nerveuses sensorielles et d'où sont issues les voies nerveuses effectrices.

Chevauchement: faille inverse très plate, mettant en contact des unités initialement situées à de grandes distances (quelques km à quelques centaines de km).

Chiasma: figure parfois observée sur les chromosomes en prophase de première division de méiose où l'on observe le croisement des chromatides de deux chromosomes homologues.

Chloroplaste: organite des cellules végétales chlorophylliennes qui contient la chlorophylle.

Chromatide: molécule d'ADN formée de deux brins, constitutive d'un chromosome. Les chromosomes ont soit une chromatide (chromosome simple) soit deux chromatides (chromosomes doubles). Les deux chromatides des chromosomes doubles sont issues de la réplication de l'ADN et sont reliées par le centromère.

Chromosomes homologues: chromosomes appartenant à une même paire. Ils portent les mêmes gènes, mais pas forcément les mêmes allèles.

Clone: population de cellules qui provient d'un précurseur cellulaire unique.

CMH: complexe majeur d'histocompatibilité, ensemble de gènes codant des protéines membranaires appelées molécules du CMH. Les lymphocytes T reconnaissent les antigènes associés aux molécules du CMH.

Coévolution: ensemble de transformations coordonnées de deux espèces en interaction l'une avec l'autre au cours de l'évolution.

Collision: affrontement de deux lithosphères continentales résultant de la disparition d'un domaine océanique par subduction.

Complexe immun: complexe formé par la liaison d'un anticorps à un antigène soluble.

Conditions P/T: conditions de pression (P) et de température (T) auxquelles sont soumises les roches.

Conduction: mécanisme de transfert de la chaleur sans déplacement de matière. La transmission de la chaleur s'effectue par agitation thermique des atomes, propagée de proche en proche aux atomes voisins. C'est le mode de propagation de la chaleur dans la lithosphère.

Convection: mode de propagation de la chaleur qui s'accompagne de mouvements de matière. C'est le déplacement de matière chaude dans un milieu froid qui provoque le transfert de chaleur. La convection assure un transfert efficace de la chaleur dans le manteau.

Convergence (zone de): zone d'affrontement de deux plaques lithosphériques.

Corps cellulaire: partie du neurone contenant le noyau (par opposition aux dendrites et à l'axone, qui sont des prolongements cytoplasmiques).

Cortex cérébral: partie superficielle du cerveau constituée de substance grise et formée de six couches superposées de neurones interconnectés.

Cortex moteur: région du cortex constituée du cortex moteur primaire (M1) et des autres aires motrices.

Cortex visuel: Région du cortex constituée du cortex visuel primaire (V1) et des autres aires visuelles.

Coulée pyroclastique: mélange de laves, de cendres, de blocs et débris à plusieurs centaines de °C dévalant les pentes d'un volcan depuis le dôme de lave sommital à plusieurs centaines de $km.h^{-1}$.

Critère d'interfécondité: principe suivant lequel deux individus appartiennent à la même espèce s'ils sont interféconds (reproduction possible, descendance viable et féconde).

Critère de ressemblance: principe suivant lequel deux individus appartiennent à la même espèce s'ils présentent généralement une certaine ressemblance morphologique. C'est ce dernier principe qui est exploité en paléontologie.

Croisement-test: croisement d'un individu avec un individu homozygote pour le(es) allèle(s) récessif(s) du gène étudié.

Croisement en retour: croisement d'un individu de la génération F1 (hétérozygote) avec l'un ou l'autre parent (homozygote). Si le parent homozygote avec lequel le croisement est effectué est de souche récessive, le croisement en retour est aussi un croisement-test.

Crossing-over (ou enjambement): échange de fragments de chromatides entre chromosomes homologues en début de méiose.

Crossing-over inégal: crossing-over au cours duquel l'échange de chromatides entre chromosomes homologues n'est pas symétrique. À l'issue de cet échange, l'un des chromosomes présente une duplication d'un fragment de son ADN, alors que l'autre présente au contraire une délétion de ce fragment.

Cuticule: couche externe, généralement résistante et imperméable, recouvrant la paroi des végétaux.

Cycle cellulaire: ensemble des étapes qui décrivent la vie d'une cellule.

Cycle de développement: enchaînement des différentes phases de la vie d'un être vivant marqué par l'alternance d'une phase haploïde (entre méiose et fécondation) et d'une phase diploïde (entre fécondation et méiose) et au cours duquel le nombre de chromosomes de l'espèce est maintenu constant.

D

Définition biologique de l'espèce: définition de l'espèce reposant sur le critère d'interfécondité.

Définition typologique de l'espèce: définition de l'espèce reposant sur le critère de ressemblance.

Dendrites: prolongements cytoplasmiques des neurones qui vont de la périphérie vers le corps cellulaire. Ils établissent des synapses avec les terminaisons nerveuses d'autres neurones. Dans le cas des neurones sensitifs, les dendrites sont à l'origine du message nerveux.

Dérive génétique: variation au hasard (aléatoire) de la fréquence des allèles dans une population. Elle est surtout une conséquence de la reproduction sexuée : seuls certains allèles sont transmis aux descendants.

Diagramme floral: représentation schématique d'une coupe transversale d'une fleur qui passerait idéalement par toutes les pièces florales.

Diploïde: se dit d'une cellule qui possède deux lots de chromosomes homologues (qu'ils soient à 1 ou 2 chromatides).

Discontinuité de Mohorovicic (Moho): discontinuité (sur laquelle les ondes sismiques se réfléchissent) séparant la croûte terrestre du manteau.

Domestication: caractérise, chez une espèce végétale ou animale, l'acquisition d'un certain nombre de caractères héréditaires au contact de l'Homme, suite à une sélection artificielle exercée par l'Homme. Les caractères sélectionnés favorisent la culture, la récolte et l'utilisation de la plante par l'Homme.

Dormance: état de vie ralentie des plantes et particulièrement des bourgeons, en hiver.

Dorsale: chaîne de montagnes sous-marines, lieu de production de la lithosphère océanique par magmatisme (fusion partielle des péridotites).

Ductile: se dit d'une roche ou d'une enveloppe terrestre qui, soumise à des contraintes, se déforme sans casser.

E

Écosystème: un écosystème est formé par un ensemble d'êtres vivants (biocénose) et un milieu de vie (biotope). Le biotope et la biocénose sont en interaction permanente.

Électromyogramme: tracé obtenu lors de l'enregistrement de l'activité électrique d'un muscle.

Énergie géothermique: énergie libérée par la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches. Elle chauffe les roches et fluides qui y circulent.

Érosion: ensemble des phénomènes qui altèrent, enlèvent les débris et particules issus de l'altération et modifient le relief.

Étamine: organe mâle de la reproduction sexuée chez les plantes à fleur.

Évolution: modifications de la composition génétique des populations au cours des générations.

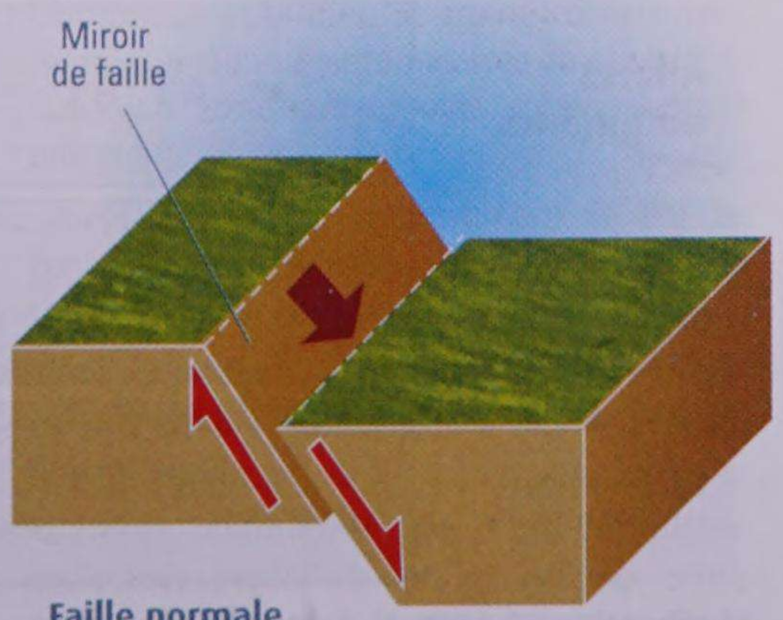
Exocytose: fusion d'une vésicule intracellulaire avec la membrane plasmique et libération de son contenu dans le milieu extracellulaire.

F

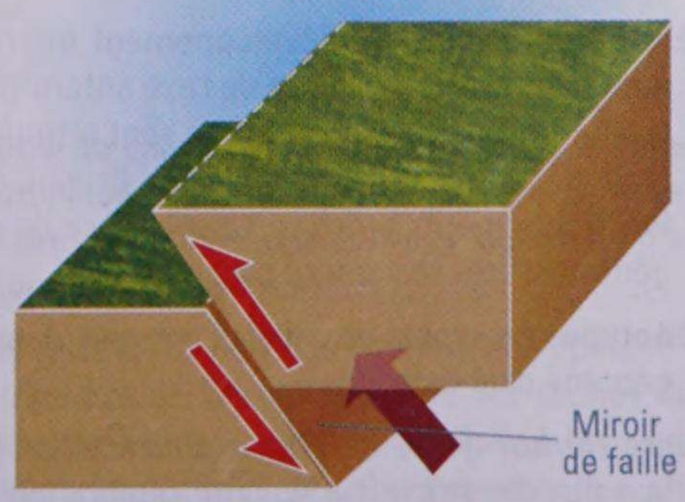
Faciès métamorphique: association de minéraux qui permet de déterminer les conditions de pression et de température dans lesquelles une roche métamorphique s'est formée.

Faille inverse: faille de compression, avec un déplacement relatif des compartiments essentiellement vertical avec resserrement. Le plan de faille est incliné dans le sens du compartiment soulevé (voir figure ci-dessous).

Faille normale: faille de distension, avec un déplacement relatif des compartiments essentiellement vertical avec écartement. Le plan de faille est incliné dans le sens du compartiment affaissé. Les failles normales découpent souvent des gradins (voir figure ci-dessous).



Faille normale



Faille inverse

LE DICO DES SVT

Famille multigénique : ensemble de gènes dérivant d'un gène ancestral par duplication et mutations.

Fécondation : union des noyaux de l'ovule et du spermatozoïde. Elle aboutit à la formation d'un zygote.

Fibres nerveuses : voir neurone.

Fleur : partie d'un végétal comprenant l'ensemble des organes reproducteurs.

Flux géothermique : quantité d'énergie géothermique dissipée par unité de temps et de surface.

Fondation (effet de) : réduction de la diversité génétique observée dans une population issue d'un faible nombre d'individus échantillonnés aléatoirement parmi les individus d'une population de départ plus grande. Cet effet est observé au cours des migrations.

Fosse océanique : dépression sous marine profonde en bordure de certains continents ou îles.

Fruit : organe contenant des graines et issu de la transformation d'une fleur suite à la pollinisation et la fécondation.

Fuseau neuromusculaire : récepteur sensoriel du muscle sensible à l'étirement.

Fusion partielle : début de fusion des composants d'une roche. Une fraction de la roche change de phase et passe de l'état solide à l'état liquide.

G

Gamète : cellule reproductrice mâle ou femelle, haploïde. Le gamète mâle est le spermatozoïde. Le gamète femelle est l'ovocyte.

Ganglion lymphatique : organe du système immunitaire. Structures plus ou moins globuleuses présentes le long des vaisseaux lymphatiques, les ganglions sont répartis dans l'ensemble du corps. Ils sont le principal site d'activation des lymphocytes B et T par les cellules présentatrices de l'antigène et les antigènes circulant. Ils constituent, avec la rate et les amygdales, les organes lymphoïdes périphériques.

Gène : fragment d'ADN gouvernant la synthèse d'une protéine. On dit qu'un gène code une protéine.

Gène du développement : gène ayant un rôle clé dans la mise en place des organes au cours du développement embryonnaire.

Gènes *Hox* : gènes du développement intervenant dans la mise en place de l'axe antéro-postérieur des animaux. Ces gènes sont retrouvés chez de nombreux animaux, où ils ont des fonctionnements proches. La séquence de ces gènes est très fortement conservée.

Génotype : ensemble des allèles présents dans le génome d'un individu.

Genre *Homo* : genre de primates caractérisé par une bipédie stricte, un volume cérébral élevé, une face réduite et plate, la réalisation d'outils.

Géotherme : courbe décrivant les variations de la température en fonction de la profondeur dans le globe terrestre.

GPS : sigle anglais pour *Global Positioning System*. Technique fondée sur l'utilisation de satellites, qui permet de positionner au millimètre près un point à la surface de la Terre.

Gradient géothermique : variation de la température sur une distance donnée dans une enveloppe terrestre.

Graine : organe des plantes à fleurs qui renferme une plantule en vie ralentie issue du développement du zygote après la fécondation, et des réserves.

Grand primate : primate caractérisé par un appendice nasal correspondant à un nez, par des orbites fermées, par des narines rapprochées et par l'absence de queue.

Granitoïde : ensemble des roches grenues à composition chimique et minéralogique globalement granitique.

Granulocyte : leucocyte (globule blanc) reconnaissable à son gros noyau multilobé et à la présence dans le cytoplasme de nombreuses granulations. Les granulocytes peuvent quitter les vaisseaux sanguins pour phagocyter des bactéries présentes dans les tissus.

H

Haploïde : se dit d'une cellule qui possède un seul lot de chromosomes (qu'ils soient à 1 ou 2 chromatides).

Hétérozygote : se dit d'un individu possédant deux allèles différents d'un gène donné.

Homologue (séquence ou gène) : se dit d'une séquence d'ADN ou d'un gène d'une espèce donnée présentant des similitudes de séquences nucléotidiques avec un autre gène/séquence d'une autre espèce. Les gènes homologues proviennent d'un gène ancestral commun.

Homozygote : se dit d'un individu possédant deux allèles identiques d'un gène donné.

Hormones végétales : molécules synthétisées par la plante, ayant une action sur le développement, à de très faibles concentrations et généralement dans des tissus différents de leur site de production.

I

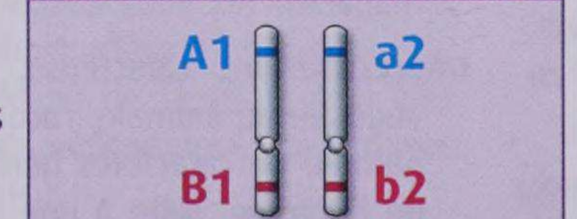
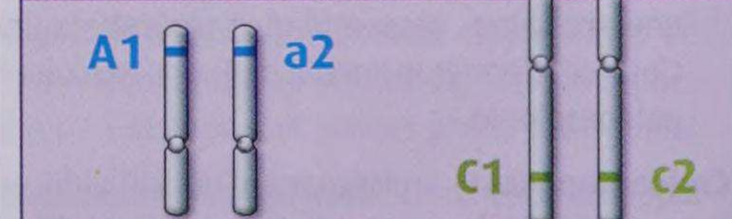
Immunisé : se dit d'un animal qui a produit des anticorps protecteurs ou des lymphocytes T activés contre un agent infectieux, suite à un premier contact, naturel (infection) ou provoqué (vaccination). L'animal immunisé devient résistant à une infection par le même agent.

Immunité innée : ensemble de réactions présentes dès la naissance et ne nécessitant pas d'apprentissage préalable qui se déclenche très rapidement face à des situations de danger diverses.

Immunodéficience : incapacité d'un individu à produire une réponse immunitaire.

Indices pétrographiques : informations issues de l'étude de la structure et/ou de la minéralogie d'une roche qui renseignent sur l'histoire de cette roche et de l'ensemble auquel elle appartient.

Indices tectoniques (ou structuraux) : ensemble de déformations (plis, failles, nappes de charriage) ayant affecté des terrains postérieurement à leur formation et témoignant des mécanismes de l'acquisition de ces déformations.

	Gènes sur le même chromosome	Gènes sur 2 chromosomes différents
Chromosomes		
Génotype	$\left(\frac{A1\ B1}{a2\ b2}\right)$	$\left(\frac{A1}{a2}, \frac{C1}{c2}\right)$
Allèles dominants	A1 B1	A1 C1
Allèles récessifs	a2 b2	a2 c2
Phénotype	[A1 B1]	[A1 C1]

Conventions d'écriture en génétique.

Infection : développement des microorganismes dans l'organisme.

Interleukine-2 (IL-2) : protéine produite par les lymphocytes T auxiliaires suite à leur activation. Elle est impliquée dans la multiplication des lymphocytes B et T.

Intrant : en agriculture, désigne l'énergie et les substances introduites dans un agrosystème par l'Homme (pétrole, eau, engrais, produits phytosanitaires, etc.).

IRM : sigle d'Imagerie par Résonance Magnétique, technique d'imagerie médicale utilisant un champ magnétique puissant et des ondes radioélectriques pour générer des images de haute qualité des structures internes du corps. L'IRM est particulièrement utile pour l'imagerie du cerveau, de la colonne vertébrale, des tissus mous des articulations et de l'intérieur des os, de l'abdomen et du bassin.

IRM fonctionnel : technique basée sur l'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui permet de détecter les zones du cerveau activées par une tâche ou une émotion. Le principe consiste à mesurer l'oxygénation, qui augmente localement dans les aires activées suite à un apport accru en sang.

Isolement génétique : caractérise deux populations lorsque les individus qui les composent ne peuvent échanger leurs allèles entre eux. L'accumulation de mutations différentes entre ces populations entraîne des divergences (morphologiques, biochimiques, écologiques) pouvant à terme induire un isolement reproducteur et l'émergence de deux nouvelles espèces.

Isolement reproducteur : caractérise deux populations lorsque les individus qui les composent ne peuvent se reproduire entre eux. L'isolement reproducteur induit donc un isolement génétique.

Isostasie : état d'équilibre de la lithosphère rigide sur la couche profonde plus déformable qu'est l'asthénosphère.

L

Lave : roche en fusion provenant d'un magma partiellement dégazé et émise à la surface d'un volcan.

Leucocyte : globule blanc (il en existe de différents types, dont les lymphocytes B et T).

Lignine : molécule complexe assurant la rigidité des tissus végétaux.

Lithosphère : enveloppe superficielle de la Terre constituée de la croûte et de la partie superficielle du manteau.

LPA (lumièré polarisée et analysée) : lumière qui traverse une lame mince d'échantillon rocheux dans un microscope dit polarisant. Elle confère aux minéraux des couleurs spécifiques qui permettent de les identifier.

LPNA (lumière polarisée et non analysée) : lumière qui traverse une lame mince d'échantillon rocheux dans un microscope dit polarisant utilisé sans analyseur. Les minéraux sont alors observés avec leurs teintes naturelles.

Lymphocyte (B ou T) mémoire : lymphocyte à longue durée de vie spécifique d'un antigène produit lors d'une réponse adaptative. Lors d'une nouvelle rencontre avec l'antigène, il se différencie plus efficacement en cellule effectrice qu'un lymphocyte naïf.

Lymphocyte autoréactif : lymphocyte qui reconnaît une molécule de l'organisme qui l'a produit.

Lymphocyte B : leucocyte capable de se lier aux antigènes extracellulaires grâce à ses anticorps membranaires et de se différencier en cellules sécrétrices d'anticorps (plasmocytes).

Lymphocyte naïf : lymphocyte (B ou T) qui n'a jamais rencontré son antigène spécifique.

Lymphocyte T auxiliaire : lymphocyte T CD4 différencié, sécrétant des interleukines responsables de la prolifération et de la différenciation d'autres catégories de lymphocytes.

Lymphocyte T CD4 : lymphocyte possédant un récepteur T spécifique, se transformant en lymphocyte T auxiliaire après activation.

Lymphocyte T CD8 : lymphocyte possédant un récepteur T spécifique, se transformant en lymphocyte T cytotoxique après activation.

Lymphocyte T cytotoxique : lymphocyte T CD8 différencié en cellule détruisant spécifiquement les cellules infectées.

M

Machine thermique : système permettant de transformer de l'énergie mécanique en chaleur et réciproquement.

Macrophage : cellule du système immunitaire provenant de la transformation d'un monocyte dans les tissus. Une des principales fonctions des macrophages est la phagocytose.

Magma : matériau liquide contenant de la roche en fusion et du gaz.

Maladies opportunistes : maladies qui apparaissent lorsque les défenses immunitaires de l'organisme sont affaiblies.

Marge continentale passive : bordure immergée d'un continent formée de croûte continentale. Au niveau d'une marge passive, on observe la transition entre cette croûte continentale et une croûte océanique.

Mastocyte : leucocyte présent dans le derme, contenant de grandes vésicules dont le contenu (histamine) est libéré suite à son activation.

Matière organique : molécules carbonées (glucides, protides, lipides...) caractéristiques des êtres vivants.

Médiateurs chimiques de l'inflammation : molécules produites par les cellules sentinelles contribuant à la mise en route de la réaction inflammatoire aiguë. On en a identifié plusieurs dizaines. Souvent un même médiateur peut être sécrété par différents types cellulaires et avoir plusieurs actions biologiques.

Médicaments anti-inflammatoires : médicaments combattant l'inflammation.

Méiose : processus constitué d'une succession de deux divisions cellulaires particulières, permettant d'obtenir 4 cellules-filles haploïdes à partir d'une cellule-mère diploïde.

Mémoire immunitaire : capacité du système immunitaire à réagir rapidement lors de contacts ultérieurs avec un antigène déjà reconnu.

Message nerveux : information véhiculée par l'intermédiaire des neurones. Le codage de cette information est assuré par la fréquence des potentiels d'action se déplaçant le long de la membrane plasmique des neurones.

Messages nerveux moteurs : message nerveux porté par un motoneurone, pouvant déclencher la contraction d'un muscle et être à l'origine d'un mouvement.

Messages nerveux sensoriels : message nerveux issu d'un récepteur sensoriel (fuseau neuro-musculaire par exemple) et porté par un neurone sensoriel.

Métamorphisme : transformation d'une roche à l'état solide du fait de modifications des conditions de pression et/ou de température après sa formation.

Mitose : division cellulaire conforme au cours d'un cycle cellulaire.

Molécules du CMH : protéines codées par les gènes du CMH, impliquées dans la présentation des peptides antigéniques aux lymphocytes T.

Monocyte : leucocyte circulant dans le sang et capables de phagocytose. Une fois activés, les monocytes quittent le sang, évoluent et deviennent des macrophages.

Morphine : molécule analgésique (qui supprime la douleur) produite par divers végétaux (pavot).

Motoneurone : neurone dont le corps cellulaire est situé dans la substance grise de la moelle épinière, qui innerve une série de fibres musculaires et permet leur contraction.

Mutation : modification de la séquence nucléotidique de l'ADN.

N

Nappe de charriage : chevauchement de grande amplitude lors duquel des terrains sédimentaires sont transportés sur des terrains en place lors d'une orogenèse

Nerf rachidien : nerf issu de la moelle épinière et résultant de la confluence de ses racines dorsales et ventrales. Il contient donc à la fois des fibres motrices et des fibres sensorielles. Chez l'homme, il en existe 31 paires.

LE DICO DES SVT

Neuromédiateur : molécule produite par un neurone et permettant la transmission du message nerveux au niveau d'une synapse.

Neurone : cellule polarisée et excitable qui produit, au niveau du corps cellulaire, des messages nerveux et les véhicule le long de son axone jusqu'à ses extrémités synaptiques.

Nuées ardentes : nuage de gaz brûlants à très forte pression transportant une grande quantité de débris de lave de toute taille et émis suite à une explosion.

O

Ondes P : premières ondes d'un séisme à être enregistrées sur un sismographe. Les ondes P voyagent dans les liquides et dans les solides.

Ophiolite : lambeau de lithosphère océanique qui s'est trouvé charrié puis dispersé sur un continent.

Organe sensoriel : organe produisant un message nerveux en réponse à une stimulation environnementale.

Organes lymphoïdes : organes irrigués par la circulation lymphatique dans lesquels les cellules immunitaires séjournent et se rencontrent pour y subir activation et maturation.

Organes lymphoïdes primaires : organes où les lymphocytes naïfs (T et B) sont produits et se différencient. La moelle osseuse est le lieu de production des lymphocytes B naïfs. Les lymphocytes T naïfs sont produits dans le thymus.

Organes lymphoïdes secondaires (périphériques) : organes où les lymphocytes (T et B) entrent en contact avec les antigènes, ce qui déclenche leur prolifération et leur différenciation.

Organite : compartiment cellulaire délimité par une membrane simple (vacuole, réticulum endoplasmique) ou double (mitochondrie, chloroplaste, noyau).

Orogénèse : ensemble des phénomènes qui président à la formation puis à la disparition d'une chaîne de montagnes (ou orogène).

P

Phagocytes : cellules capables de phagocytose. Appartenant à plusieurs catégories (macrophages ou granulocytes par exemples), elles interviennent dans les différentes étapes de la réaction innée et dans la réaction adaptative.

Phagocytose : processus d'ingestion de particules ou de microorganismes réalisé par certaines cellules immunitaires (macrophages et granulocytes notamment), qui sont qualifiées de phagocytes.

Phénotype immunitaire : ensemble des caractéristiques de reconnaissance spécifique que possède le système immunitaire à un moment donné de l'existence d'un individu. Il résulte de l'interaction entre le génotype immunitaire et l'environnement, et il peut être modifié par la vaccination.

Phénotype macroscopique/cellulaire : ensemble des caractères d'un individu/d'une cellule. Pour les conventions d'écriture, voir l'encadré en bas de la p. 372.

Phénotype moléculaire : ensemble des protéines d'une cellule.

Phloème : tissu conducteur assurant le transport de la sève élaborée chez les plantes.

Photosynthèse : ensemble des transformations chimiques réalisé par les organismes chlorophylliens grâce à l'énergie lumineuse. La photosynthèse permet la production de molécules organiques glucidiques à partir d'eau et de dioxyde de carbone.

Phylogénie : reconstitution des relations de parenté entre groupes d'organismes. La phylogénie dit quels groupes sont plus étroitement apparentés entre eux qu'à d'autres.

Pièces florales : différents organes de la fleur. On distingue les pièces florales stériles (sépales, étamines) des pièces florales fertiles (étamine, pistil) directement impliquées dans la reproduction sexuée.

Pistil : organe femelle des plantes à fleur. Il comprend l'ovaire, le style, et le stigmate.

Plante hybride : plante provenant de la reproduction sexuée entre deux individus appartenant à deux espèces différentes. Chez les plantes, un hybride peut être issu de l'hybridation entre deux espèces dont les lots chromosomiques ont été doublés. De ce fait, la plante hybride est tétraploïde (4n), la méiose est possible et la plante est fertile.

Plantes anémogames : plantes dont le pollen est véhiculé par le vent.

Plantes entomogames : plantes dont le pollen est transporté par les insectes.

Plantes herbacées : plantes caractérisées par la présence d'une tige non rigide.

Plantes ligneuses : plantes caractérisées par la présence d'une tige rigide (exemple : arbres, arbustes). Cette propriété est assurée par la présence de lignine dans la paroi de certaines cellules.

Plante OGM (Organisme Génétiquement Modifié) : plante dont le matériel génétique a été modifié (modification de l'expression de l'un de ses gènes ou introduction d'un gène étranger qualifié de transgène).

Plaque lithosphérique : plaque constituée de lithosphère océanique et/ou continentale, qui a un comportement rigide, qui accumule des déformations au niveau de ses frontières et qui est animée d'un mouvement de rotation à la surface du globe. Des mouvements relatifs d'une plaque par rapport à une autre peuvent être définis.

Plaque motrice : voir synapse neuromusculaire.

Plasmocyte : lymphocyte B différencié en cellule sécrétrice d'anticorps.

Plasmocyte mémoire : cellule effectrice conservée après une réponse adaptative, expliquant la présence d'anticorps spécifiques dans le sang d'un individu ayant été en contact avec un agent infectieux.

Plasticité cérébrale : capacité d'adaptation anatomique et fonctionnelle du cerveau en fonction des expériences vécues par l'individu.

Pli : structures formées par la transformation ductile des roches.

Poil absorbant : cellule de l'épiderme de la racine assurant l'absorption d'eau et des sels minéraux.

Point chaud : zone à forte activité magmatique en milieu océanique ou continental, à l'aplomb d'un panache ascendant de matériau mantellique chaud d'origine profonde.

Pollen : ensemble de grains produits par les étamines et contenant les gamètes mâles.

Pollinisation : transport du pollen (qui contient les gamètes mâles) depuis les étamines jusqu'au stigmate du pistil (qui contient les gamètes femelles).

Pollinisation croisée : caractérise la pollinisation des plantes à fleur lorsque le pollen et le pistil sur lequel il est déposé appartiennent à des individus différents.

Polyploïdisation : multiplication (le plus souvent duplication) des chromosomes, donc de la totalité du génome d'un organisme.

Population : ensemble d'individus appartenant à la même espèce et occupant le même territoire géographique.

Potentiel d'action : inversion transitoire de la différence de potentiel entre l'extérieur et l'intérieur d'un neurone (dépolarisation). Le message nerveux véhiculé par un axone est une succession (ou train) de potentiels d'action de fréquence donnée.

Potentiel d'action musculaire : potentiel d'action se propageant à la surface de la cellule musculaire. Il déclenche la contraction de la cellule musculaire.

Potentiel de membrane : différence de potentiel existant de part et d'autre de la membrane plasmique d'une cellule vivante.

Potentiel de repos : potentiel de membrane d'une cellule excitable (neurone, cellule musculaire) en l'absence d'excitation (au repos).

Prévalence : fréquence d'une maladie donnée dans une population donnée.

Primate : mammifère caractérisé notamment par la présence d'un pouce opposable et d'ongles.

Prisme d'accrétion : accumulation de sédiments océaniques et continentaux dans une zone de subduction. Ces sédiments sont « râclés » mécaniquement sur la plaque plongeante.

Pronucleus : décrit le noyau de l'ovule (pronucleus femelle, à n chromosomes) ou du spermatozoïde (pronucleus mâle, à n chromosomes), dans l'ovule, juste avant leur fusion.

Protéine : molécule constituée par un assemblage ordonné, ou séquence, d'acides aminés.

R

Racine crustale : épaississement de la croûte continentale à l'aplomb des chaînes de montagnes.

Radiochronologie : méthode de datation des roches fondée sur la décroissance radioactive naturelle de certains éléments chimiques dans les minéraux qui les constituent.

Réaction inflammatoire aiguë : réaction physiologique locale des tissus infectés. Elle se traduit par une vasodilatation (rougeur), une augmentation de la perméabilité vasculaire (provoquant œdème et douleur), une augmentation de la température et un afflux de leucocytes : granulocytes et monocytes.

Récepteur T : protéine de la membrane plasmique des lymphocytes T qui se lie spécifiquement à un antigène associé aux molécules du CMH. Chaque lymphocyte T ne produit qu'un seul type de récepteur T dont il existe une très grande diversité : il ne peut donc être activé que par un antigène donné.

Récepteur sensoriel : structure qui détecte une variation de l'environnement appelée stimulus et produit un message nerveux sensoriel.

Recyclage de la lithosphère : ensemble des processus qui conduisent à la transformation des matériaux de la lithosphère ou à leur incorporation dans le manteau sous-jacent.

Réflexe myotatique : mouvement involontaire entraînant la contraction d'un muscle en réponse à son propre étirement.

Remaniements intrachromosomiques : apparition de nouvelles combinaisons d'allèles sur les chromosomes remaniés suite aux crossing-over.

Rendement : biomasse utile produite par unité de surface et de temps ($kg.ha^{-1}.an^{-1}$).

Réplication (de l'ADN) : mécanisme où la molécule d'ADN se duplique à l'identique lors de la phase S de l'interphase du cycle cellulaire.

Réponse immunitaire adaptative (spécifique) : réponse immunitaire mettant en jeu des cellules (lymphocytes B et T) possédant des récepteurs spécifiques. Les anticorps produits par les plasmocytes neutralisent spécifiquement les antigènes et les lymphocytes T cytotoxiques provoquent la lyse des cellules infectées.

Réponse immunitaire adaptative humorale : réponse immunitaire adaptative impliquant la sécrétion de molécules (anticorps).

Réponse immunitaire primaire : réponse du système immunitaire face à un agent pathogène qu'il n'a jamais rencontré. Le temps de latence entre l'infection et la réponse primaire est en général d'une dizaine de jour.

Réponse immunitaire secondaire : réponse adaptative produite par l'organisme lors d'un contact avec un antigène qu'il a déjà rencontré. Elle fait intervenir la mémoire immunitaire et est plus efficace et plus rapide que la réponse primaire.

Reproduction sexuée : production d'un nouvel individu comprenant une combinaison originale des allèles de ses deux parents. Fait intervenir la méiose et le fécondation.

Rifting : formation d'un fossé d'effondrement, ou rift, par amincissement et étirement de la lithosphère continentale. Le rifting peut conduire à l'ouverture d'un océan. Il est associé à une activité magmatique.

Rigide : se dit d'une roche ou d'une enveloppe terrestre qui, soumises à des contraintes, se déforment en cassant.

Roche grenue : roche dont tous les éléments sont cristallisés et les cristaux visibles à l'œil nu.

Roche magmatique : roche issue de la cristallisation plus ou moins rapide d'un magma.

Roche métamorphique : roche provenant de la transformation d'une roche à l'état solide à la suite de changement de conditions de température et/ou de pression.

Roche microlithique : roche contenant du verre et de petits cristaux allongés non visibles à l'œil nu.

Roche plutonique : roche magmatique issue du refroidissement lent, en profondeur, d'un magma. Les roches plutoniques sont des roches entièrement cristallisées.

Roche sédimentaire : roches formées à la surface de la Terre, résultant du transport, de l'accumulation puis de la compaction de sédiments. Selon l'origine de ceux-ci, on parle de roches détritiques (ex : grès), biogène (ex : calcaire) ou physico-chimiques (ex : sel gemme).

Roche volcanique : roche magmatique formée à partir de lave émise par un volcan, solidifiée en partie en surface. Les roches volcaniques sont formées suite à un refroidissement rapide et ne sont donc pas entièrement cristallisées.

S

Sédiment : dépôt meuble d'éléments de taille variable provenant de roches préexistantes (débris issus de l'érosion), d'organismes (débris de coquilles) ou encore d'une précipitation chimique, ayant subi un transport (notamment par l'eau).

Sédimentation : dépôt, après transport, d'éléments provenant de roches préexistantes (produits de l'érosion, débris volcaniques), d'organismes, ou résultant d'une précipitation chimique.

Ségrégation des allèles : répartition des allèles au sein des cellules filles au cours de la méiose.

Sélection clonale : processus permettant la production des cellules effectrices de l'immunité adaptative.

Sélection naturelle : variation non aléatoire de la fréquence des allèles dans une population. Dans un milieu donné, certains allèles confèrent un avantage à ceux qui les portent, qui ont donc plus de chances de vivre et de se reproduire. La fréquence de ces allèles augmente ainsi dans la population.

Sélection phénotypique : technique de sélection artificielle consistant à choisir à l'intérieur d'une population les individus présentant le ou les caractères recherchés (phénotype) et à les faire se reproduire.

Sélection variétale : ensemble de techniques ayant pour objectifs l'obtention de variétés et de semences améliorées.

Séropositivité : présence dans le sang d'un anticorps spécifique d'un antigène.

Sève brute : solution puisée dans le sol contenant de l'eau et des sels minéraux. Elle circule dans la plante dans les vaisseaux du xylème.

Sève élaborée : solution formée dans les feuilles contenant des molécules organiques (saccharose, acides aminés) produites au cours de la photosynthèse. Elle circule dans la plante dans les vaisseaux du phloème.

Sida : syndrome d'immunodéficience acquise, d'origine virale (causé par le virus de l'immunodéficience humaine), qui conduit à la destruction progressive du système immunitaire.

Sismique réflexion : méthode d'étude du sous-sol fondée sur l'analyse de la réflexion d'ondes sonores et permettant de localiser des surfaces qui séparent des couches géologiques. Les ondes se réfléchissent sur ces surfaces (dites de discontinuité).

Sismique réfraction : méthode d'étude du sous-sol fondée sur l'analyse de la réfraction d'ondes sonores au niveau de surfaces séparant des couches géologiques (surfaces de discontinuité). La sismique réfraction permet de calculer la vitesse de propagation des ondes dans les différentes couches traversées.

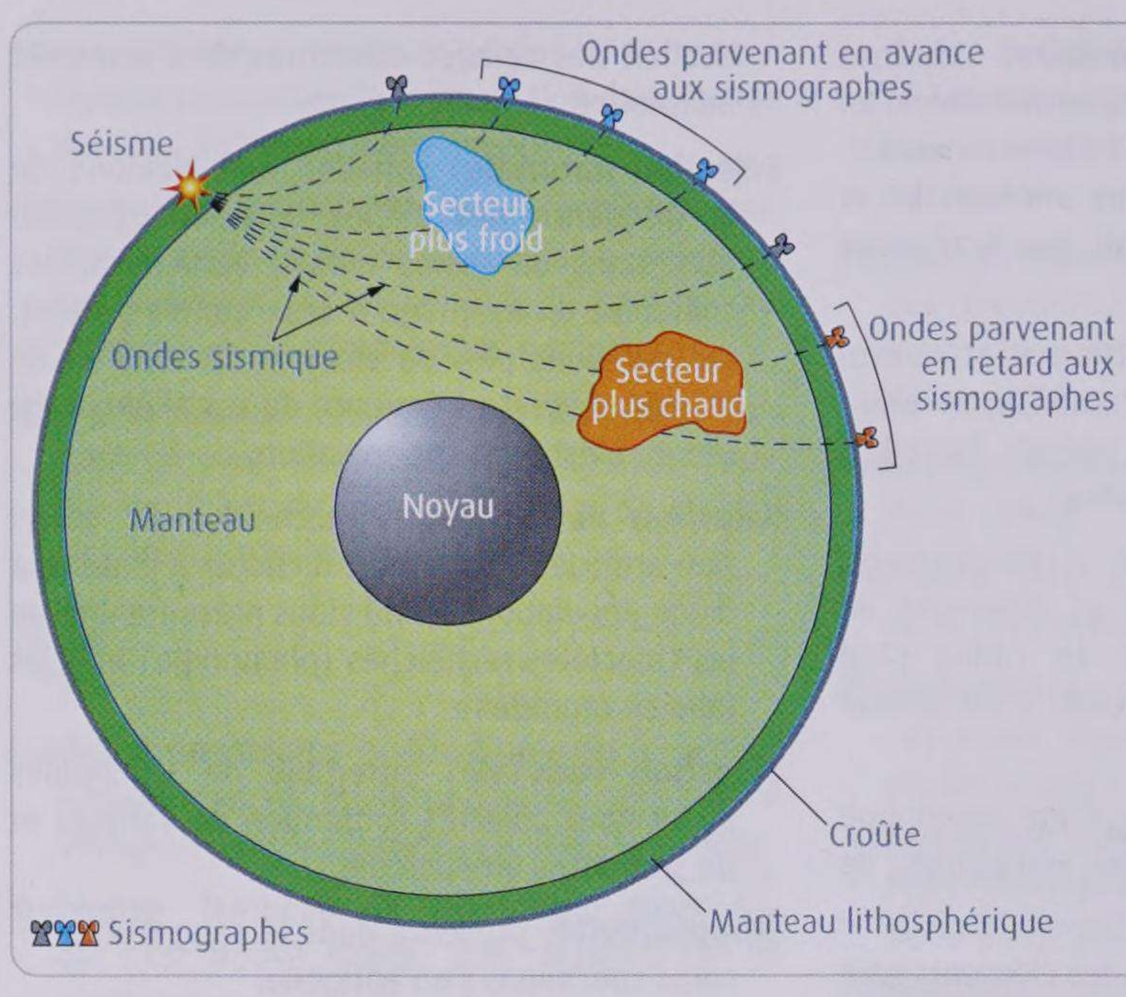
Solidus : courbe pression - température expérimentale séparant les domaines ou la phase solide existe seule de celui où elle coexiste avec la phase liquide. Autrement dit, c'est la courbe de fusion commençante.

Solidus hydraté : courbe de fusion commençante obtenue en présence d'eau.

Spéciation : processus de formation des espèces.

Stomate : ensemble de deux cellules de l'épiderme des feuilles, ménageant entre elles un espace par lequel s'effectuent les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère (respiration, transpiration, photosynthèse).

Structure grenue : structure caractéristique des roches magmatiques plutoniques : la roche est constituée d'un assemblage de minéraux tous visibles à l'œil nu.



L'étude de très nombreux séismes a permis de calculer un profil moyen de vitesse des ondes sismiques dans le manteau en fonction de la profondeur (modèle d'un globe à symétrie sphérique). Si une onde sismique traverse un milieu dont les propriétés physiques (densité, température) différent de celles du modèle moyen, elle arrivera en retard ou en avance par rapport aux prédictions de ce modèle. L'analyse d'un grand nombre de temps de parcours permet de construire des cartes des écarts de vitesses sismiques par rapport au modèle : c'est le principe de la tomographie sismique.

Structure microlitique : structure caractéristique des roches magmatiques volcaniques : la roche est constituée de minéraux invisibles à l'œil nu (les microlites) et de verre.

Subduction : enfoncement de la lithosphère dans le manteau sous-jacent au niveau des fosses océaniques.

Subsidence : enfoncement de structures géologiques lié aux mouvements des plaques lithosphériques à la surface du globe. Elle peut impliquer le jeu des failles normales ou des phénomènes thermiques. On parle alors de subsidence thermique (enfoncement de la lithosphère océanique au fur et à mesure de son éloignement de la dorsale).

Surface d'échange : paroi dont les caractéristiques (surface, épaisseur, perméabilité) permettant un transfert de matière optimal entre deux compartiments.

Symbiose : association obligatoire, à bénéfice réciproque entre deux espèces.

Symbiote : être vivant associé à un autre dans une symbiose.

Synapse : zone de contact entre deux neurones ou entre un neurone et une cellule effectrice.

Synapse neuromusculaire : zone de contact entre une terminaison synaptique d'un neurone et une cellule musculaire. L'arrivée d'un message nerveux au niveau de la terminaison synaptique provoque la contraction de la cellule musculaire.

T

Terminaison synaptique : extrémité de l'axone formant une synapse avec une cellule. L'arrivée d'un potentiel d'action au niveau de la terminaison synaptique entraîne l'exocytose des vésicules pré-synaptiques et la libération du neuromédiateur dans l'espace synaptique.

Terrain : ensemble formé par les roches à l'affleurement, objet d'études géologiques.

Thylakoïde : structure contenue dans le chloroplaste, ayant la forme d'un petit sac aplati et impliqué dans les premières étapes de la photosynthèse.

Tomographie sismique : technique permettant de cartographier l'intérieur du globe terrestre en trois dimensions en utilisant les anomalies de vitesse des ondes sismiques (voir encadré ci-dessus).

Traduction : fabrication, dans le cytoplasme, d'une protéine à partir de l'ARN messager.

Transcription : fabrication, dans le noyau, d'une molécule d'ARN à partir d'un gène.

Transfert horizontal : échange de matériel génétique entre des organismes d'espèces différentes. Un individu transmet ainsi un/des gènes à un individu sans relation de descendance.

Transformation minéralogique : modification de la composition minéralogique (apparition de certains minéraux, disparition d'autres minéraux) d'une roche, le plus souvent associée à un changement de condition de pression et de température et sans qu'il y est nécessairement un changement de la composition chimique de la roche.

Transgénèse : technique consistant à transférer des gènes d'un organisme vers un autre organisme.

Transpiration foliaire : perte de vapeur d'eau par les feuilles, via les stomates et/ou la cuticule.

Trithérapies : méthode de traitement du sida associant deux inhibiteurs de la transcriptase inverse (enzyme synthétisant de l'ADN à partir de l'ARN viral) et un inhibiteur de protéase virale. Ces trois médicaments antiviraux ont pour but de limiter la multiplication du virus.

Trou occipital : orifice (en arrière et en bas du crâne) par lequel passent les artères spinales, les artères vertébrales, les racines spinales, les nerfs crâniens et la moelle épinière.

U V

Unité motrice : ensemble de fibres musculaires innervées par un même motoneurone.

Vaccin : préparation contenant un agent pathogène rendu inoffensif ou certain de ses antigènes, capable de déclencher une réaction immunitaire.

Vaccin inactivé : vaccin composé de microorganismes tués (par la chaleur, par un agent chimique) ou de certains de leurs composants purifiés.

Vaccin vivant (atténué) : vaccin composé de microorganismes vivants non pathogènes. La virulence des souches pathogènes peut être atténuée en laboratoire à la suite de passages en culture cellulaire ou par génie génétique. Les bactéries ou virus ainsi obtenus sont inoffensifs, mais identiques en apparence au virus/bactérie ciblé par le vaccin pour le système immunitaire.

Vaccination : injection d'antigènes sous une forme immunogène, mais non pathogène.

Variété : une espèce cultivée existe sous différentes variétés qui présentent des variations dans leurs caractères agronomiques et nutritionnels.

Verticille : cercle sur lequel sont disposées les pièces florales d'un même type.

Vie ralentie : état où toutes les activités (respiration, échanges nutritifs, synthèses, croissance) sont réduites. Si certaines conditions sont remplies, l'organisme peut reprendre la vie active.

Viscosité : résistance qu'un corps déformable oppose à l'écoulement. Les laves émises dans les zones de subduction sont visqueuses et s'accumulent au sommet du volcan, créant un dôme de lave.

X Z

Xylème : tissu conducteur assurant le transport de la sève brute chez les plantes.

Zone pilifère : portion de l'extrémité des racines porteuse de poils absorbants.

Zygote : cellule diploïde résultant de la fusion de deux gamètes haploïdes.

Les modalités de l'épreuve de SVT du baccalauréat

Coefficient de l'épreuve de SVT : 6 pour les élèves ne participant qu'à l'enseignement obligatoire de SVT, 8 pour les élèves participant, en plus, à l'enseignement de spécialité SVT.

1 Épreuve écrite — 16 points - 3 h 30

- L'objectif de l'épreuve écrite est de valider la maîtrise des compétences acquises tout au long de la scolarité au lycée et consolidées en classe de Terminale dans le cadre des enseignements de SVT. L'épreuve porte principalement sur les connaissances et capacités du programme de Terminale, mais certains sujets peuvent conduire à mobiliser celles des classes antérieures.
- Le sujet comporte **deux parties à traiter obligatoirement**, qui se rapportent à différents domaines du programme.

Capacités évaluées / Modalités d'évaluation		Questionnement	Supports proposés dans le sujet
Partie 1	Maîtrise des connaissances **8 points**	Question de synthèse → ***Voir p. 378*** ***et/ou*** QCM → ***Voir p. 379***	Aucun document ***ou*** un/plusieurs document(s)
Partie 2	**Exercice 1** Capacité à raisonner à partir de l'exploitation de documents scientifiques **3 points**	Question ouverte ***ou*** QCM → ***Voir p. 379***	Un ou deux documents
	Exercice 2 Capacité à mener une démarche scientifique à partir de l'exploitation d'un ensemble de documents et en mobilisant ses connaissances **5 points**	Question amenant le candidat à choisir sa démarche personnelle, à élaborer son argumentation et à proposer une conclusion → ***Voir p. 380-381***	Plusieurs documents

2 Épreuve pratique d'évaluation des compétences expérimentales — 4 points - 1 h

- L'objectif de l'épreuve pratique est d'évaluer les compétences travaillées en travaux pratiques tout au long de la scolarité au lycée, et consolidées en classe de Terminale dans le cadre des enseignements de SVT.
- L'épreuve teste non seulement les compétences techniques, mais aussi les capacités de raisonnement et de mobilisation des connaissances.

Capacités principales :
- Comprendre la manipulation (2-3 points)
- Utiliser des techniques (10 points)
- Utiliser des modes de représentation des sciences expérimentales (5 points)
- Appliquer une démarche explicative (2-3 points)
- L'épreuve est notée sur 20. La note est ensuite divisée par 5.

Sites utiles
- Pour vous familiariser avec l'épreuve, vous avez accès à la banque nationale de sujets, téléchargeable, sur le site Eduscol (http://eduscol.education.fr/cid47782/liste-des-situations-d-evaluation.html). 25 sujets de la banque sont retenus, et leur liste publiée au Bulletin officiel (http://www.education.gouv.fr/pid285/le-bulletin-officiel.html) au cours du troisième trimestre. Chaque établissement choisit dans cette liste sa propre sélection de sujets, en fonction des apprentissages réalisés en cours d'année.
- Liste détaillée des capacités et des critères d'évaluation sur le site Eduscol (http://eduscol.education.fr/pid24300-cid47781/capacites-experimentales-et-criteres-d-evaluation.html).
- De nombreuses fiches techniques sont disponibles sur le site de l'Académie de Toulouse et peuvent être utilisées tout au long de l'année pour s'entraîner ou réviser (http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/bankact/index.php?m=1&sm=1).

MÉMO BAC

La question de synthèse

1 Présentation de l'épreuve

- La question de synthèse est conçue pour évaluer vos connaissances et votre capacité à organiser un exposé qui recoupera **plusieurs chapitres de votre cours** dans un texte scientifiquement et grammaticalement correct, illustré si nécessaire de schémas (certains sont donc à apprendre par cœur).
- **Deux à trois documents** peuvent vous être proposés pour guider votre réflexion, en relation avec le problème posé. Ils vous aideront à construire votre devoir de synthèse et à répondre à la question posée par le sujet. Vous devez cependant utiliser vos connaissances pour présenter d'autres facettes non proposées par les documents et enrichir ainsi votre réponse.

2 Pour réussir une question de synthèse

Bien comprendre le sujet

- **Le lire attentivement** : il vous indique souvent le plan et les limites du sujet.
- **Repérer** :

– les verbes d'action qui renseignent sur la nature du travail demandé (exemples : exposer, schématiser, mettre en relation, etc.)
– les mots clés qui permettent de cerner le problème général à résoudre.

Attention au hors-sujet

Élaborer un brouillon

- Ne rien rédiger.
- Chercher les deux ou trois grandes parties du sujet qui constitueront le plan du devoir.
- Noter :

– le vocabulaire scientifique à utiliser impérativement ;
– les notions à développer ;
– les illustrations (schémas, tableaux, courbes) à intégrer dans le texte.

- Construire un plan en deux ou trois parties titrées et numérotées.

Le plan comporte deux ou trois parties, mais pas plus

Rédiger le devoir

- L'exposé est organisé.
- Il contient une introduction, un développement structuré en 2 ou 3 parties et une conclusion :

– **Introduction :** au minimum, elle pose le problème et annonce le plan.
– **Développement** :
  ➜ Il est subdivisé en deux ou trois parties
  ➜ tous les documents éventuellement associés au sujet doivent être utilisés
  ➜ les schémas que vous proposez ou que le sujet demande de réaliser doivent être clairs, titrés, légendés et s'intégrer au texte.
– **Conclusion :** elle reprend succinctement les principales idées de chaque partie et répond clairement au problème posé.

Chaque partie porte un titre qui soulève un problème ou définit le contenu de votre paragraphe

Avant de rédiger la conclusion, relire le problème posé : la conclusion doit y répondre

Quelques conseils pratiques

- **Soigner :**

– la présentation globale : écrire lisiblement, souligner les titres et les termes scientifiques à la règle ;
– les schémas ;
– l'expression.

- **Éviter :**

– les ratures ;
– les renvois, notes dans la marge et abréviations (sauf celles conventionnellement acceptées : ADN, ARN, etc.).

- **Aérer** votre texte en ménageant des espaces entre les parties et en séparant bien les réponses à des questions différentes.
- **Relire** afin de corriger les fautes, en particulier dans le vocabulaire scientifique.

Les QCM

1 Les QCM au baccalauréat

- Un QCM (questionnaire à choix multiples) n'est pas un simple exercice de mémoire. Il vise à évaluer vos connaissances et vos capacités à les utiliser en les confrontant à d'autres données, dans le cadre d'un raisonnement ou de la résolution d'un problème, en s'appuyant ou non sur des documents.

2 Pour répondre à un QCM

Exemple 1

Évaluation de votre capacité à tirer des informations d'une photographie et de vos connaissances sur le fonctionnement synaptique.

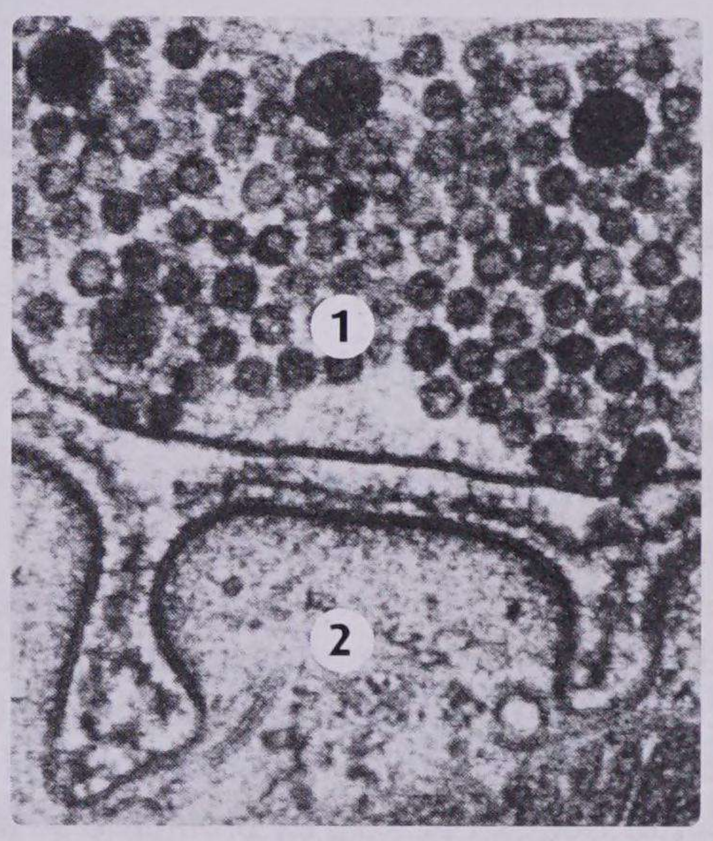
La photo ci-contre a été prise au microscope électronique à transmission au niveau d'une synapse neuromusculaire d'un muscle de grenouille. En observant cette image, un scientifique, on peut en déduire que le message peut passer :

Un QCM débute par une amorce (énoncé et/ou question) qui définit un problème ou une situation donnée et pose une question

Cochez uniquement la réponse exacte

Soyez vigilant au mode de réponse attendu. Ici, une seule réponse à cocher

- ❑ de 1 vers 2 car le neuromédiateur est présent dans le neurone 1.
- ❑ de 1 vers 2 car le neuromédiateur est présent dans le neurone 2.
- ❑ de 2 vers 1 car le neuromédiateur est présent dans le neurone 1.
- ❑ de 2 vers 1 car le neuromédiateur est présent dans le neurone 2.



Exemple 2

Évaluation de vos capacités à tirer des informations de résultats de croisements et à utiliser vos connaissances sur les brassages alléliques.

Pour expliquer la diversité des génomes, on réalise le croisement-test suivant chez la drosophile, en considérant deux couples d'allèles : *L* et *vg* ; *G* et *b* (les allèles *L* et *G* sont dominants) :
Les résultats de ce croisement sont indiqués ci-contre :

Femelles de génération F1 [L, G] **Hétérozygotes pour les deux gènes**	×	**Mâles [vg, b]** **Homozygotes pour les deux gènes**		
Phénotypes de la descendance obtenue (mâles et femelles)	[L, G]	[L, b]	[vg, G]	[vg, b]
Pourcentage de chaque phénotype	43,5 %	6,5 %	6,5 %	43,5 %

Cochez la ou les réponse(s) exacte(s)

Ici, plusieurs réponses justes sont éventuellement à cocher

- ❑ Les femelles de la génération F1 produisent 4 types de gamètes tous génétiquement différents.
- ❑ Les proportions des différents phénotypes obtenus illustrent le brassage interchromosomique.
- ❑ Les deux gènes considérés sont situés sur le même chromosome.
- ❑ Le génotype des femelles F1 est (L, G)//(L, G).

Bon à savoir

- Pour chaque question, les points ne sont pas attribués si :
  - vous cochez plusieurs réponses alors qu'une seule est attendue ;
  - vous ne cochez pas toutes les réponses justes, dans le cas où plusieurs réponses sont à cocher ;
  - aucune réponse n'est cochée (il y a toujours au moins une réponse juste).

MÉMO BAC

L'étude d'un ensemble de documents

1 Présentation de l'épreuve

- L'exercice 2 de la partie 2 de l'épreuve écrite permet d'évaluer votre capacité à mener une démarche scientifique afin de répondre à un problème grâce à l'exploitation d'un ensemble de documents et à la mobilisation de vos connaissances.

2 Pour réussir une étude de documents

Bien comprendre le sujet

- **Lire attentivement le sujet** afin d'identifier le problème posé et d'en cerner les limites.

Élaborer un brouillon

- Étudier succinctement les documents dans l'ordre où ils sont présentés et noter pour chacun d'eux les informations utiles apportées en relation avec le problème posé.
- Réfléchir aux mises en relation possibles entre les documents.

Rédiger le devoir

- Écrire une phrase d'**introduction** qui pose le problème.
- **Exploiter** les différents documents :

– annoncer le document étudié ;

– exploiter le document sans commencer par donner des connaissances. Il s'agit d'observer le document, d'effectuer des déductions, de les mettre éventuellement en relation avec des informations issues de l'analyse d'autres documents, puis de conclure en complétant éventuellement avec vos connaissances.

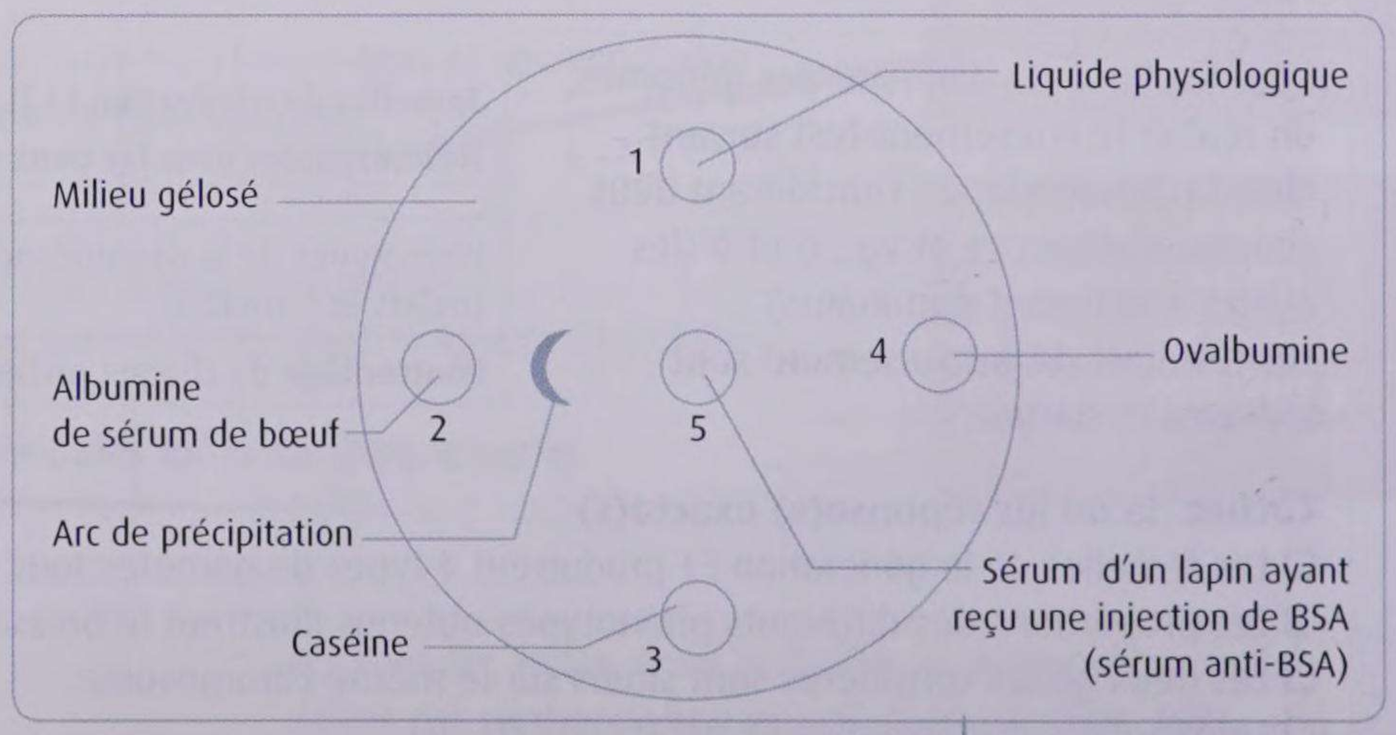
- **Conclure :** la mise en relation des informations déduites durant l'étude des différents documents permet de répondre de façon claire et précise au problème posé.

3 Un exemple commenté d'étude de documents

Le sujet

À partir des informations extraites de l'analyse des trois documents et de vos connaissances, mettez en évidence la spécificité des anticorps et leur diversité.

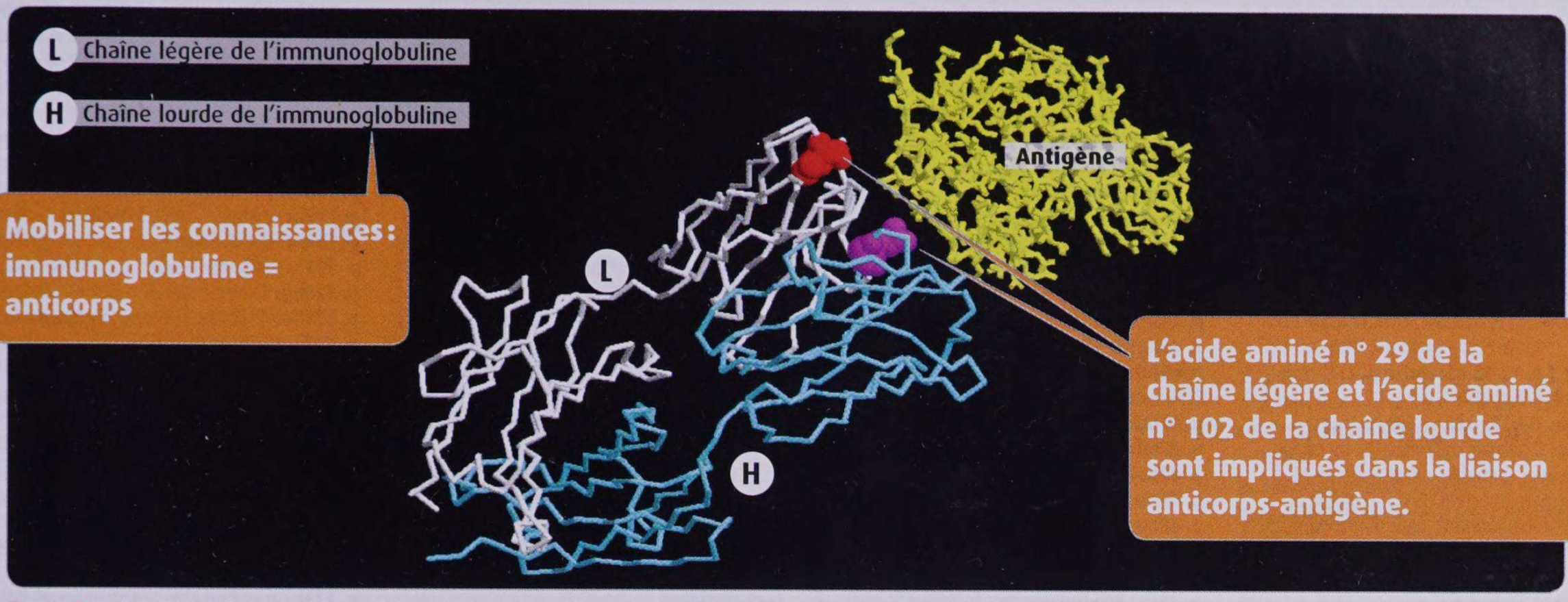
Exploitation des documents



Doc. 1. Résultats du test d'Ouchterlony 24 heures après les dépôts. BSA : albumine de sérum de bœuf ; 1, 2, 3, 4 : puits où sont placées les substances supposées antigéniques ; 5 : puits central où se trouve un anticorps.

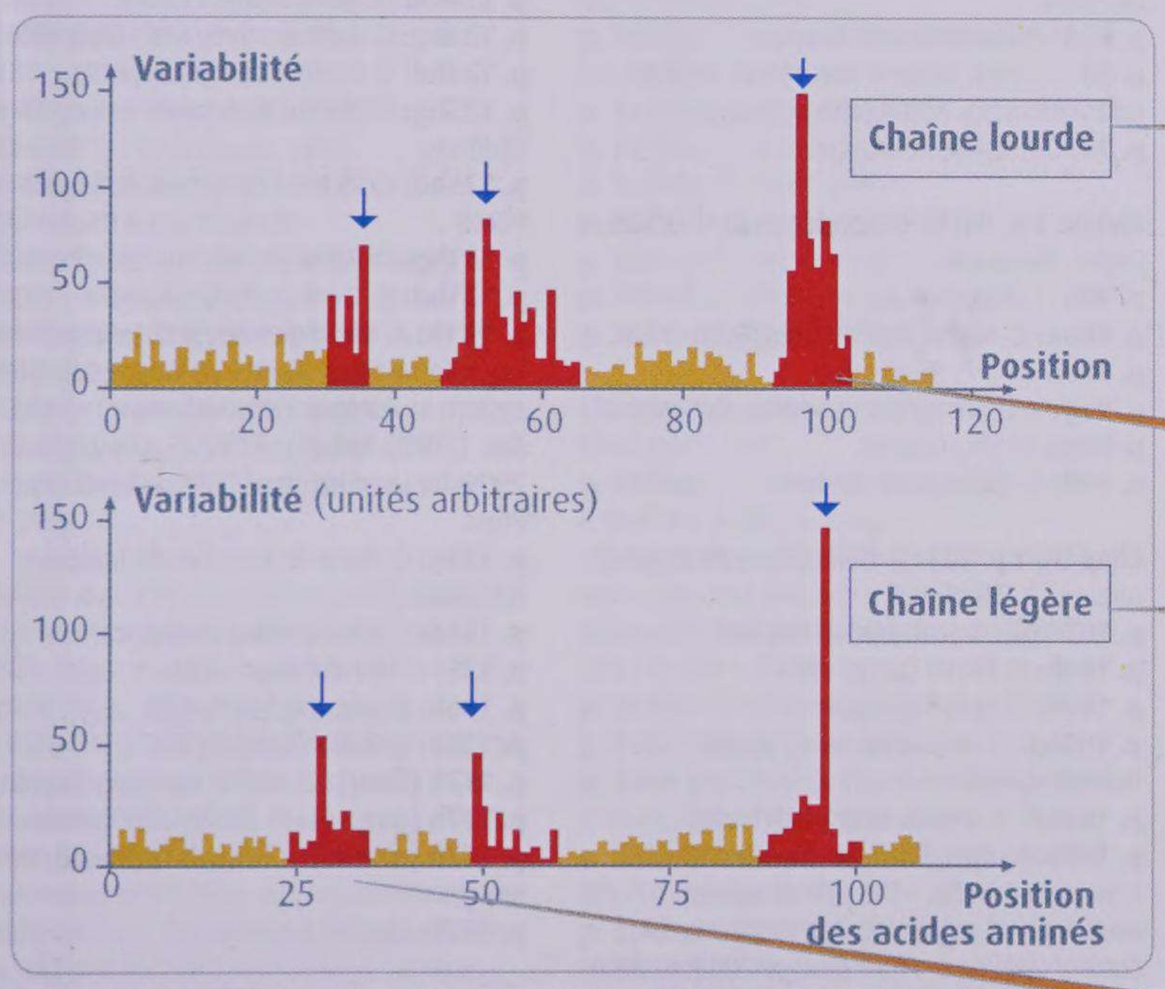
→ À cette étape, on peut déjà parler de spécificité des anticorps contenus dans le sérum anti-BSA pour l'antigène albumine de bœuf et de la formation de complexes anticorps-antigène pour l'arc de précipitation.

Comparez les résultats obtenus et cherchez le facteur qui varie afin d'expliquer la présence d'un arc seulement entre albumine de bœuf et sérum anti-BSA.



Doc. 2. Modélisation moléculaire d'un complexe antigène/anticorps (logiciel Rastop).

➜ Décrire le document pour pouvoir le mettre ensuite en relation avec le document 3.



Doc. 3. Variabilité des acides aminés en fonction de leur position dans les chaînes d'immunoglobulines.

Cette courbe concerne la chaîne lourde. Le doc 2 montre une liaison avec l'antigène proche de l'acide aminé 102 de cette chaîne.

Mise en relation

De l'acide aminé 99 à 104, grande variabilité de la chaîne lourde.

Cette courbe concerne la chaîne légère. Le doc 2 montre une liaison avec l'antigène proche de l'acide aminé 29 de cette chaîne.

Mise en relation

De l'acide aminé 28 à 34, grande variabilité de la chaîne légère

➜ Décrire le document puis mettre la position des acides aminés, leur variabilité et leur implication dans la liaison avec l'antigène telle qu'observée doc. 2.

Conclusion

La mise en relation des trois documents va vous permettre de rédiger votre conclusion :
- le doc. 1 montre une spécificité des anticorps et la liaison anticorps-antigène (formation d'un complexe immun) ;
- le doc. 2 montre que la liaison anticorps-antigène implique certains acides aminés de la chaîne lourde et de la chaîne légère ;.
- le doc. 3 montre que, sur les deux chaînes, ces acides aminés font partie d'une région très variable des anticorps. Il met ainsi en évidence la diversité des anticorps et montre qu'elle est à l'origine de leur spécificité.

Crédits photographiques

Couverture: Femelle semnopithèque et son petit *(Presbytis cristata)* © Michiel Vaartjes/Fotonatura/Biosphoto
Rabat intérieur1: Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. *Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, Geochem. Geophys. Geosyst., 9, Q04006* – Image © M. Elliot Lim, CIRES & NOAA/NGDC
Rabat intérieur2: Granulocyte © Hervé Conge – ISM
Monocyte © Hervé Conge – ISM
Macrophage © Ralph Hutchings/BSIP
Mastocyte © Dr Robert Calentine/Visual Unlimited/BSIP
Dendritique © Colette Dezutter-Dambuyant/Inserm
Lymphocyte © Hervé Conge – ISM
Plasmocyte © Phototake/Koziner/BSIP

Thème 1 p. 12-13 et reprise p. 2: © P. Wegner/Arco/BSIP
p. 14hg: © Ed Reschke/Getty Images
p. 14hd: © Visuals Unlimited/Getty Images
p. 14b: avec l'aimable autorisation de M. W. Nachman, directeur du dpt *Écologie et Biologie évolutionniste*, univ. d'Arizona, Tucson (extrait de Nachman M.W. *et al.,* PNAS, 100: 5268-5273, fig. 1B © 2003 National Academy of Sciences, États-Unis)
p. 15g: © Alfred Pasieka/SPL/Cosmos
p. 15d: 2 ph. © MNHN/Bernard Faye

Chapitre 1 p. 17: © Margot Granitsas/BSIP
p. 18: 2 ph. © LookatSciences
p. 19hg: Benjamin Loppin
p. 19hd: © LookatSciences
p. 19b: 3 ph. © Carolina Biological/Visuals Unlimited/Corbis
p. 19b: 2 ph. © Solvin Zankl/Visuals Unlimited/Corbis
p. 20hg: © Biodisc/Visuals Unlimited/BSIP
p. 20: 7 ph. © Ed Reschke/Getty Images
p. 21h: T. Hassold, S. Sherman, P. Hunt, «Counting cross-overs: characterizing meiotic recombination in mammals», *Hum. Mol. Genet.* (2000) 9 (16): 2409-2419 Copyright © 2000, by permission of Oxford University Press
p. 21m: E. Rebollo, P. Arana «Active role of lagging chromosomes in spindle collapse as revealed by live phase contrast and tubulin immunostaining in grasshopper spermatocytes», *Chromosoma* 110 (4) Copyright © 2001, Springer Berlin/Heidelberg With kind permission from Springer Science+Business Media
p. 23: © Science VU/B. John/Visuals Unlimited/Corbis
p. 25: Evelyne Heyer
p. 26: Benjamin Loppin
p. 27: Frantz Depaulis
p. 28: Raquel Tavares
p. 29: Garcia-Cruz, et al «Cytogenetic analyses of human oocytes provide new data on non-disjunction mechanisms and the origin of trisomy 16 R.», *Hum. Reprod. (2010) 25 (1): 179-19.* Copyright © 2010, Oxford University Press
p. 38h: © Thinkstock/Hemera et iStockphoto
p. 38b: 3 ph. © Carolina Biological/Visuals Unlimited/Corbis

Chapitre 2 p. 39: © Georgette Douwma/Getty Images
p. 40: Xiuli Zhao *et al.,* «Mutations in HOXD13 Underlie Syndactyly Type V and a Novel Brachydactyly-Syndactyly Syndrome», *Am. J. Hum. Genet.* (2007) 80(2):361-371 © 2007 by The American Society of Human Genetics. All rights reserved. © 2007, Elsevier.
p. 41hg: © Colibri/J.-L. Paumard
p. 41mg: © Colibri/A.-M. Loubsens
p. 41hd et 41b: Arhat Abzhanov, *et al.,* «Bmp4 and Morphological Variation of Beaks in Darwin's Finches» *Science,* 3 September 2004: vol. 305 (5689) pp. 1462-1465, copyright © 2004, American Association for the Advancement of Science
p. 42: Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature* 403 (6771): 785–9, (2000). Mi S., Lee X., Li X. *et al.*, «Syncytin is a captive retroviral envelope protein involved in human placental morphogenesis», Copyright © 2000, Rights Managed by Nature Publishing Group
p. 43h: Marc-André Sélosse
p. 43bg: © M. Oldfield/SPL/Cosmos
p. 43bm: © Caillaud Marie-Cécile/INRA
p. 43bd: © Colibri/V. Renard
p. 44g: Malika Anouche
p. 44d: © Benoît Bock/Photoflora
p. 45hg: © Dennis Kunkel Microscopy, Inc./Phototake – ISM
p. 45hd: Alexandre Meinesz
p. 45b: © Biophoto Associates/BSIP
p. 46hg: © Allemand Pierre/INRA
p. 46hd: © Dr. Gerald Van Dyke/Visuals Unlimited/Getty Images
p. 47hg: Marc-André Sélosse
p. 47hd: © Oxford Scientific/Getty Images
p. 47m et 47b: © Hervé Conge
p. 48m: 2 ph. © Cyril Ruoso/Biosphoto
p. 48bg: © Matthew Fleming/Getty Images
p. 48bd: © Yukihiro Fukuda/naturepl.fr/EB Photo
p. 49: © Rolf Nussbaumer/naturepl.fr/EB Photo
p. 55h: © Kim Taylor/naturepl.fr/EB Photo
p. 55b: © Dr J. Burgess/SPL/Cosmos
p. 56: © Dr John D. Cunningham/Visuals Unlimited/BSIP

Chapitre 3 p. 57: © Tui de Roy/Minden Pictures/Getty Images
p. 59: 2 ph. © Photo12.com/Alamy
p. 60g: © Michael Redmer/Visuals Unlimited/BSIP
p. 60d: © Photo12.com/Alamy
p. 61h: Guillaume Lecointre
p. 61bg: © Colibri/J.-L. Ermel
p. 61bd: © John Carnemolla/Corbis
p. 62: Buffon et Cuvier © North Wind Pictures/Leemage - Darwin © Heritage Images/Leemage
p. 63g: © Margo Peron (http://www.zperonowki.com)
p. 63d: copyright Andrzej Jan Taramina, www.bearcreeksanctuary.com
p. 68: © Paal Hermansen/Photoshot/Biosphoto
p. 69hg: © Mike Lane/Biosphoto
p. 69hd: © Ashok Jain/naturepl.fr/EB Photo
p. 69b: © Photo12.com/Alamy
p. 70: © Andrew Walmsley/naturepl.fr/EB Photo

Chapitre 4 p. 71: © Philippe Plailly/Eurelios/LookatSciences
p. 72 (lémur): © John Downer/naturepl.fr/EB Photo
p. 72 (tarsier): © David Tipling/naturepl.fr/EB Photo
p. 72 (saki): © Colibri/F. et J.-L. Ziegler
p. 72 (gorille): © T.J. Rich/naturepl.fr/EB Photo
p. 72 (bonobo): © Anup Shah/naturepl.fr/EB Photo
p. 72 (macaque): © Bernard Castelein/naturepl.fr/EB Photo
p. 73: © Alain Bénéteau 2012 (www.paleospot.com)
p. 74 (gibbon): © Rod Williams/naturepl.fr/EB Photo
p. 74 (orang-outan): © Anup Shah/naturepl.fr/EB Photo
p. 74 (chimpanzé): © Florian Möllers/naturepl.fr/EB Photo
p. 74 (gorille): © T.J. RICH/naturepl.fr/EB Photo
p. 74 (homme): © Getty images/Jupiterimages/Goodshot
p. 77: Michel Morange
p. 78: 4 ph. © Bone Clones, www.boneclones.com
p. 78b: F. Barron, C. Woods, K. Kuhn, J. Bishop, M. J. Howard, and D. E. Clouthier, «Downregulation of *Dlx5* and *Dlx6* expression by Hand2 is essential for initiation of tongue morphogenesis», *Development* (2011) 138: 2249-2259 © The Authors, published by The Company of Biologists Ltd
p. 79g: Collection Christophel
p. 79d: © Anup Shah/naturepl.fr/EB Photo
p. 80hg: © MNHN/Daniel Ponsard
p. 80bg: © Philippe Plailly/Eurelios/LookatSciences
p. 80d: 2 ph. Paxal image/C. Michel
p. 81g: Sandrine Prat
p. 81d: © Matthew Bennett/Bournemouth University
p. 82g: © Philippe Plailly/Eurelios/LookatSciences
p. 82d: 1 ph. © Natural History Museum of London/Biosphoto
p. 83g: © RMN-GP/Loïc Hamon
p. 83m: © MNHN/Daniel Ponsard
p. 83d: © DRAC Rhône Alpes ministère de la culture et de la communication
p. 84: Véronique Barriel
p. 85hg: © Javier Trueba/MSF/SPL/Cosmos
p. 85bg: © Philippe Plailly/Eurelios/LookatSciences
p. 85d: © Alain Bénéteau 2012 (www.paleospot.com)
p. 91g: © M. & G. Therin-Weise/AGE fotostock
p. 91d: © Natural History Museum of London/Biosphoto
p. 93g: © Georgette Douwma/naturepl.fr/EB Photo
p. 93d: © Nicole Gravier-Bonnet
p. 94: © Frank Vinken/Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig
p. 95: Collection ChristopheL

Thème 2 p. 96-97 et reprise p. 2: © Olivier Digoit/Biosphoto
p. 98h: © IRD/Janeau
p. 98bg: © Michel Bureau/Biosphoto
p. 98bd: © J.-C. Révy – ISM
p. 99g: © Meckes/Eye of science/Cosmos
p. 99m: © SPL/Cosmos
p. 99d: © Colibri/J.-M. Brunet

Chapitre 1 p. 101: © Hans Christoph Kappel/naturepl.fr/EB Photo
p. 102-103: © Jean-Michel Picoche
p. 104h: © Hervé Conge – ISM
p. 104b: © Hervé Conge
p. 105hg: © Dennis Drenner/Visuals Unlimited/BSIP
p. 105hd: © Visuals Unlimited/Corbis
p. 105b: J. López-Bucio, A. Cruz-Ramırez, L. Herrera-Estrella, «The role of nutrient availability in regulating root architecture», *Current Opinion in Plant Biology* 2003, 6: 280-287, © 2003 Elsevier
p. 106hg: © Jean-Michel Picoche
p. 106bg: © Porreye Jean-Louis, Dordor Françoise/INRA, Montpellier SupAgro
p. 106hd: 2 ph. © Hervé Conge
p. 106bd: Takashi Tsukamoto *et al.* «^{52}Fe Translocation in Barley as Monitored by a Positron-Emitting Tracer Imaging System (PETIS): Evidence for the Direct Translocation of Fe from Roots to Young Leaves via Phloem», *Plant Cell Physiol* (2009) 50 (1): 48-57 © The Authors 2008 © 2010 Oxford University Press
p. 107g: © Hervé Conge – ISM
p. 107d: C. E. J. Botha, N. Aoki, G. N. Scofield, L. Liu, R. T. Furbank & R. G. White, «A xylem sap retrieval pathway in rice leaf blades: evidence of a role for endocytosis? », *J. Exp. Bot.* (2008) 59 (11): 2945-295 © The Authors 2008 © 2010 Oxford University Press
p. 108: © Alain Mafart-Renodier/Biosphoto
p. 109hd et 109bm: © J.-M. Labat & Y. Lanceau/Biosphoto
p. 109bg: © Hervé Conge
p. 109bd: © Benoît Bock/Photoflora
p. 114: © Dr Jack Bostrack/Visuals Unlimited/BSIP
p. 115: © Colibri/S. Breal
p. 116h: © Hervé Conge
p. 116m: © Benoît Bock/Photoflora
p. 116b: Philip M. Wargo, *Estimating Starch Content in Roots of Deciduous Trees-A Visual Technique,* US Government printing office, 1975

Chapitre 2 p. 117: © CNRS Photothèque/Florian Brioudes
p. 118 : 6 ph. © Hervé Conge
p. 119h: © Photo12.com/Alamy
p. 119m: © J.-E. Faure
p. 119b: Catherine Lenne
p. 120hg: © Hervé CONGE – ISM
p. 120hd: © Power & Syred/SPL/Cosmos
p. 120b: © Christian Bock
p. 121: 6 ph. © Hervé Conge
p. 122h: © Cordelia Molloy/SPL/Cosmos
p. 122mg: © Jean-Luc Tasset/Photoflora
p. 122md: © Marg Cousens/Getty Images
p. 122bg: © Photo12.com/Alamy
p. 122bd: © S. Gschmeissner/SPL/Cosmos
p. 123hg: © Benoît Bock/Photoflora
p. 123hd: © J.-C. Révy/Lab. de Palynologie/MNHN Paris – ISM
p. 123b: avec l'aimable autorisation de Steve Johnson (Anderson, B, Johnson, S. D. & Carbutt, C. «Exploitation of a specialized mutualism by a deceptive orchid», *American Journal of Botany.* 2005; 92:1342-13499 © 2005 by Botanical Society of America)
p. 124mg: © Jean-Luc Tasset/Photoflora
p. 124md: © Jean-Michel Picoche
p. 124bg: © Keith Burdett/GAP/Biosphoto
p. 124bd: © Frédéric Fève/Biosphoto
p. 125hg: © Staffan Widstrand/naturepl.fr/EB Photo
p. 125hd: © Richard Kirby/naturepl.fr/EB Photo
p. 131hg: © Robin Monchâtre/Biosphoto
p. 131hd: © Thinkstock/iStockphoto
p. 131b: A. Shuttleworth, S. D. Johnson, «A key role for floral scent in a wasp-pollination system in *Eucomis* (Hyacinthaceae)», *Ann. Bot.* (2009) 103 (5): 715-725, Copyright © 2009, by permission of Oxford University Press
p. 133g: © Annie & Jean-Claude Malausa/Biosphoto
p. 133d: © iStockphoto/Thinkstock
p. 135: © Hervé Conge – ISM
p. 136h: © Jean-Michel Picoche
p. 136b: © Toillon Sylvie/INRA
p. 137h (fleur): © Michel Gunther/Biosphoto
p. 137h (gousse): © Thinkstock/Hemera
p. 137h (abeille): © Visuals Unlimited/Getty Images
p. 137b: Logiciel Mesurim

Thème 3 p. 138-139 et reprise p. 2: © Christophe Boisvieux/Corbis
p. 140h et 140md: Paxal image/C. Michel
p. 140mg: © Hervé Conge
p. 140b: © François Michel

Chapitre 1 p. 143: © Angelo Gandolfi/naturepl.fr/EB Photo
p. 144: © Andrew Stacey
p. 145: Paxal image/C. Michel
p. 146 sauf bd: Paxal image/C. Michel
p. 146bd: © Christophe Ben
p. 152h: © Anne Woehrlé
p. 152b et reprise p. 159: © François Michel
p. 153 et reprise p. 159: © Beat Meier
p. 154g et 154d, et reprise p. 159: © Hervé Conge
p. 154b: Patrice Cordier
p. 155 et reprise p. 159: © Pierre Thomas
p. 161h: © Natural History Museum of London/Biosphoto
p. 161b: © Pierre Carrière (http://cirquedebarrosa.free.fr)

p. 162h: data from http://grace.jpl.nasa.gov», and Paulson, Zhong, and Wahr, «Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data», *Geophys. J. Int.* (2007) 171, 497–508.
p. 162b: © Christian Robert, ENS Paris

Chapitre 2 p. 163: Nasa/GSFC, Rapid Response
p. 164h: © Stephan Camillo
p. 164mg: © Hervé Conge – ISM
p. 164md: Paxal images/C. Michel
p. 164md (vignette), 164bg et 164bd: © Christian Robert, ENS Paris
p. 165h: Nasa/GSFC, Rapid Response
p. 165b: Nasa's Terra satellite
p. 166: 2 ph. © Anne Woehrlé
p. 167: © François Michel
p. 168hg: Paxal images/C. Michel (échantillon C. Robert ENS Paris)
p. 168hd: © Anne Woehrlé
p. 168mg: Paxal images/C. Michel (échantillon C. Robert, ENS Paris)
p. 168md: © Hervé Conge
p. 168b: Paxal images/C. Michel (échantillon C. Robert, ENS Paris)
p. 170h: Damotte et al., 1990, «Mise en œuvre, traitement et présentation du profil plaine du Pô – massif Central», *Bulletin de la Societé géologique de France*
p. 173: Pierre Thomas
p. 178: © Christian Nicollet (http://christian.nicollet.free.fr/)
p. 179 : © H. P. Schert

Chapitre 3 p. 181: © Beawiharta Beawiharta/Reuters
p. 182hg: © Beawiharta Beawiharta/Reuters
p. 182hd: © Clara Prima/AFP
p. 182b: © Sigit Pamungkas/Reuters
p. 183h: Paxal images/C. Michel
p. 183m: © Hervé Conge
p. 186hg: Paxal images/C. Michel
p. 186hd: © Hervé Conge – ISM
p. 186bg: Paxal images/C. Michel
p. 186bd: © Anne Woehrlé
p. 188h: © Diane D. Miller/Getty Images
p. 188b: © Ocean/Corbis
p. 189h: 2 ph. © Bernard Barbarin
p. 197h: © D. Mollex, ENS de Lyon
p. 198: © Jacques et Aïcha Guarinos (données: J. et A. Guarinos, *Archives des Sciences,* Genève, 1993, vol. 46, fasc. 3, pp. 303-319)

Chapitre 4 p. 199: Nasa/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team
p. 201: Paxal images/C. Michel
p. 202h: Nasa/GSFC, Rapid Response
p. 202b: Nasa/GSFC, Rapid Response/Chelys srl
p. 204g: Nasa
p. 204d: © Marli Miller
p. 205: Christian Sue et al. «Aseismic deformation in the Alps: GPS vs. seismic strain quantification», *Terra Nova,* 2007, vol. 19, no. 3, p. 182-188 © 2007, John Wiley and Sons
p. 207: © Martin Guitreau
p. 215: © Hervé Conge
p. 216h: Paxal images/C. Michel
p. 216b: © Marc Diraison
p. 217: Paxal images/C. Michel
p. 218: 2 ph. © Hervé Conge
p. 219: © Fairbanks Daily News/ZUMA-REA

Thème 4 p. 220-221 et reprise p. 3: © Rob Broek/Getty Images
p. 222g: Logiciel Sismolog
p. 222d: © A. Dewaele et C. Sanloup

Chapitre 1 p. 225: © Stephen Belcher/Foto Natura/Getty Images
p. 227h: Jacques Varet
p. 227b: Albert Genter
p. 231 et 233: Paxal images/C. Michel
p. 239: © Selva/Leemage

Chapitre 2 p. 241: © John Marshall/AGStock-REA
p. 242 sauf hd: 3 ph. © Jean Weber/INRA
p. 242hd: © Christian Slagmulder/INRA
p. 244: © nito - © Karl Bolf - © felinda - © Rafa Irusta - © marilyn barbone/Fotolia.com
p. 245: Jorge Dubcovsky and Jan Dvorak, «Genome Plasticity a Key Factor in the Success of Polyploid Wheat Under Domestication», *Science* 29 June 2007: Vol. 316 no. 5833 pp. 1862-1866
p. 246h: © Hugh Iltis (http://teosinte.wisc.edu)
p. 246m: © P. Psaila/Doublevue.fr
p. 248h: Calville © Vincent M. & E. Studler/Biosphoto – **granny** © Frédéric Didillon/Biosphoto – **golden** © NouN/Biosphoto – **ariane** © François Laurens/INRA
p. 248b: © Frédérique Didelot/INRA
p. 250h: © Albert Amiot-Faivre/INRA
p. 250bg et 250bm: © P.Goetgheluck/DoubleVue.fr
p. 250bd: © Stephan Elleringmann/LAIF-REA
p. 259: *ETOPO1 Ice Surface Global Relief Model, NOAA NGDC* - Image J. Varner and E. Lim, CIRES, Univ. of Colorado at Boulder, 2008
p. 260: © Benoit Decout/REA
p. 261h: © De Agostini/Leemage
p. 261b: © Andreas Fechner/LAIF-REA

Thème 5 p. 262-263 et reprise p. 3: © NIBSC/SPL/Cosmos
p. 264hg: © Dennis Kunkel Microscopy Inc. – ISM
p. 264hm: © Chassenet/BSIP
p. 264hd: © Grave E./SPL/Cosmos
p. 264bg: © Platriez/BSIP
p. 264bd: © Hervé Conge – ISM
p. 265hg: © Hervé Conge – ISM
p. 265hd: © Photo Josse/Leemage
p. 265m: © Meckes/SPL/Cosmos

Chapitre 1 p. 267: © Dr Dennis Kunkel/Phototake – ISM
p. 268hg: C.L. Romanò, N. Logoluso, F. Dell'Oro, A. Elia, L. Drago, «Telethermographic findings after uncomplicated and septic total knee replacement», *The Knee*, online 26 March 2011 © 2011, Elsevier
p. 268hd: © Phototake/Camazine/BSIP
p. 268b (virus): © Cosmos/SPL
p. 268b (bactérie et *Candida*): © Meckes/Ottawa/Eye of Science/Cosmos
p. 268b (*Plasmodium*): © Eye of Science/SPL/Cosmos
p. 269hg: © Dr Alvin Telser/Visuals Unlimited/Corbis
p. 269hg (vignette): © Dr Gladden Willis/Visuals Unlimited/Corbis
p. 269hd: © CNRI/SPL/Cosmos
p. 269hm (vignette): © Biophoto Associates/SPL/Cosmos
p. 269hd (vignette): © Hervé Conge – ISM
p. 270h: © Scharf David/SPL/Cosmos
p. 270b: Ng LG, Hsu A, Mandell MA, Roediger B, Hoeller C, et al. 2008 Migratory Dermal Dendritic Cells Act as Rapid Sensors of Protozoan Parasites. PLoS Pathog 4(11): e1000222. © 2008 Ng *et al.*

p. 271g : © Dr Fred Hossler/Visuals Unlimited/Corbis
p. 271d: © Inserm
p. 272h: © SERCOMI/BSIP
p. 272m: © Dr David M. Phillips/BSIP
p. 274hg: © Nyu Franklin Research Fund/Phototake – ISM
p. 274hd: © SPL/Cosmos
p. 274bg: D. Gotthardt, H. J. Warnatz, O. Henschel, F. Brückert, M. Schleicher, and T. Soldati, «High-Resolution Dissection of Phagosome Maturation Reveals Distinct Membrane Trafficking Phases» *Mol. Biol. Cell* 2002 13:10 3508-3520 © 2012 The American Society for Cell Biology
p. 274bd: P. Herbomel, B. Thisse, and C. Thisse, «Ontogeny and behaviour of early macrophages in the zebrafish embryo», *Development* 1999 126:3735-3745. Published by the Company of Biologits Ltd.
p. 281: *Lectures of the Comparative Patholgy of inflammation,* E. Metchnikoff, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co, London, 1893
p. 282: P. H. S. Kwakman, A. A. te Velde, L. de Boer, D. Speijer, C. M. J. E. Vandenbroucke-Grauls, and S. A. J. Zaat «How honey kills bacteria» FASEB J July 2010 24:2576-2582 © 2012 by The Federation of American Societies for experimental Biology

Chapitre 2 p. 283: © Olivier Schwartz/SPL/Cosmos
p. 284: © Belin/V. Gauvreau
p. 285h: © E. Delain, IGR-CNRS UMR8532
p. 285b: © Belin/V. Gauvreau
p. 287: © Eye of science/SPL/Cosmos
p. 288m: © Daniel Zagury
p. 288b: Fig. 1bcd in J. C. Stinchcombe and G. M. Griffiths, «Secretory Mechanisms in Cell-Mediated Cytotoxicity», *Ann. Rev. of Cell Dev. Biol.*, Vol. 23: 495-517, 2007 © 2007 by Annual Reviews. All rights reserved
p. 290: La Ligue contre le cancer – Inserm U653 – Institut Curie/S. Amigorena et S. Hugues
p. 291h: 2 ph. © Steve Gschmeissner/SPL/Cosmos
p. 291b: © Dr Dennis Kunkel/Phototake – ISM
p. 292: Françoise Salvadori
p. 294: © Eye of Science/Cosmos
p. 295: Jacques Lebowitch
p. 303: Fig. 1B in M. Wellington, J. M. Bliss, C. G. Haidaris,« Enhanced Phagocytosis of *Candida* Species Mediated by Opsonization with a Recombinant Human Antibody Single-Chain Variable Fragment», *Infect. Immun,* December 2003 vol. 71 no. 12 7228-7231© 2003, American Society for Microbiology
p. 305: ©B. Boissonnet/BSIP
p. 306 : © akg-images/Science Photo Libra
p. 308: Jean-François Saluzzo
p. 311: © Carlf Zhang/Reuters
p. 320h: © OTO/CHU Bordeaux/BSIP
p. 320bg: *Lectures of the Comparative Patholgy of inflammation,* E. Metchnikoff, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co, London, 1893
p. 320bd: P. Ehrlich, «On immunity with special reference to cell life», *Proc. Roy. Soc. London,* vol. 6, p. 424-448, 1900 – BNF Paris
p. 321h: © Fréderic Maigrot/REA
p. 321b: © Laurent Cerino/REA

Thème 6 p. 322-323 et reprise p. 3: © Sean Davey/Aurora photos/Corbis
p. 324h: © Darren Whiteside/Reuters
p. 324bg: © Dr D. Kunkel/Phototake – ISM
p. 324bd: © T. Deerinck/NCMIR/SPL/Cosmos

p. 325: RA Poldrack, JE Desmond, GH Glover, and JD Gabrieli, «The neural basis of visual skill learning: an fMRI study of mirror reading», *Cereb. Cortex* (1998) 8(1): 1-10 © 1998, Oxford University Press

Chapitre 1 p. 327: © Phototake/Bartee/BSIP
p. 330: © Hervé Conge
p. 331hg: © Jean-Claude Révy – ISM
p. 331hd: © S. Gschmeissner/SPL/Cosmos
p. 331b: Gary Banker & Stefanie Kaech-Petrie / Jungers Center for Neurosciences Research
p. 332: © Hervé Conge – ISM
p. 333h: © PLS/Boyd
p. 333b: © Dr Fred Hossler/BSIP
p. 334: droite in A. L. Hodgkin et A. F. Huxley, «Resting and action potentials in single nerve fibres», *J. Physiol.,* vol. 104, p. 176-195, 1945. - **gauche** in A. L. Hodgkin et A. F. Huxley, *Nature,* vol. 144, p. 710, 1939
p. 335: Logiciel Sherrigton © Philippe Cosentino
p. 336h: P. Fatt et B. Katz, «Spontaneus subthreshold activity at motor nerve ending», *J. Physiol.*, vol. 117, p. 109-128, 1952
p. 336bg et reprise p. 379: © Pr John Heuser, Washington university School of medecine
p. 336bd: © Don W. Fawcett/BSIP
p. 337g: Fig. 1 e in M. Kerschensteiner, M. S Reuter, J. W Lichtman & T. Misgeld, «Ex vivo imaging of motor axon dynamics in murine triangularis sterni explants», *Nature Protocols* 3, 1645 - 1653 (2008) © 2012 Nature Publishing Group, a div. of Macmillna Publ. Ltd. All Right Reserved
p. 337d: © Eric Feferberg/AFP
p. 343: © A. Hart-Dabis/SPL/Cosmos
p. 344: Fig. 1CD in A. Engel *et al.* «Ultrastructural localization of the acetylcholine receptor in myasthenia gravis and in its experimental autoimmune model», *Neurology* April 1977 27: 307 Wolters Kluwer Health © 1977 by the American Academy of Neurology

Chapitre 2 p. 345: © Stephen Simpson/Getty Images
p. 346hg: © Simon Fraser/SPL/Cosmos
p. 346hd: Images from Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL) at MIT and the Surgical Planning Laboratory (SPL) of Brigham and Women's Hospital
p. 347: © Thinkstock/Hemera
p. 348g: © Xu Jianjun/Xinhua Press/Corbis
p. 348d: © Simon Fraser/SPL/Cosmos
p. 350h: Logiciel Eduanatomist
p. 350b: © Thinkstock/Hemera
p. 351: © Thinkstock/iStockphoto
p. 352: Catherine Vidal
p. 361: Assal F., Schwartz S. et Vuilleumier P., «Moving with or without will: functional neural correlates of alien hand syndrome», *Annals of Neurology* 62, 3: 301-306. John Wiley and Sons © 2007 American Neurological Association
p. 362: © Belin/V. Gauvreau
p. 363: © Jean-Claude Révy – ISM
p. 364h: © Jason Reed/Reuters
p. 364b: © Christophe Merceron/Inserm
p. 365h: Logiciel Nerf © Pierre Perez
p. 365b: © Astier – CHRU Lille/BSIP

Illustrations: Thomas Haessig (http://tessig.ultra-book.com/book); Amandine Wanert (http://www.amandinewanert.com/) ; Corédoc/Laurent Blondel (http://www.coredoc.fr/); Alain Bénéteau (http://www.paleospot.com)
Conception graphique intérieure: Marie-Astrid Bailly-Maître

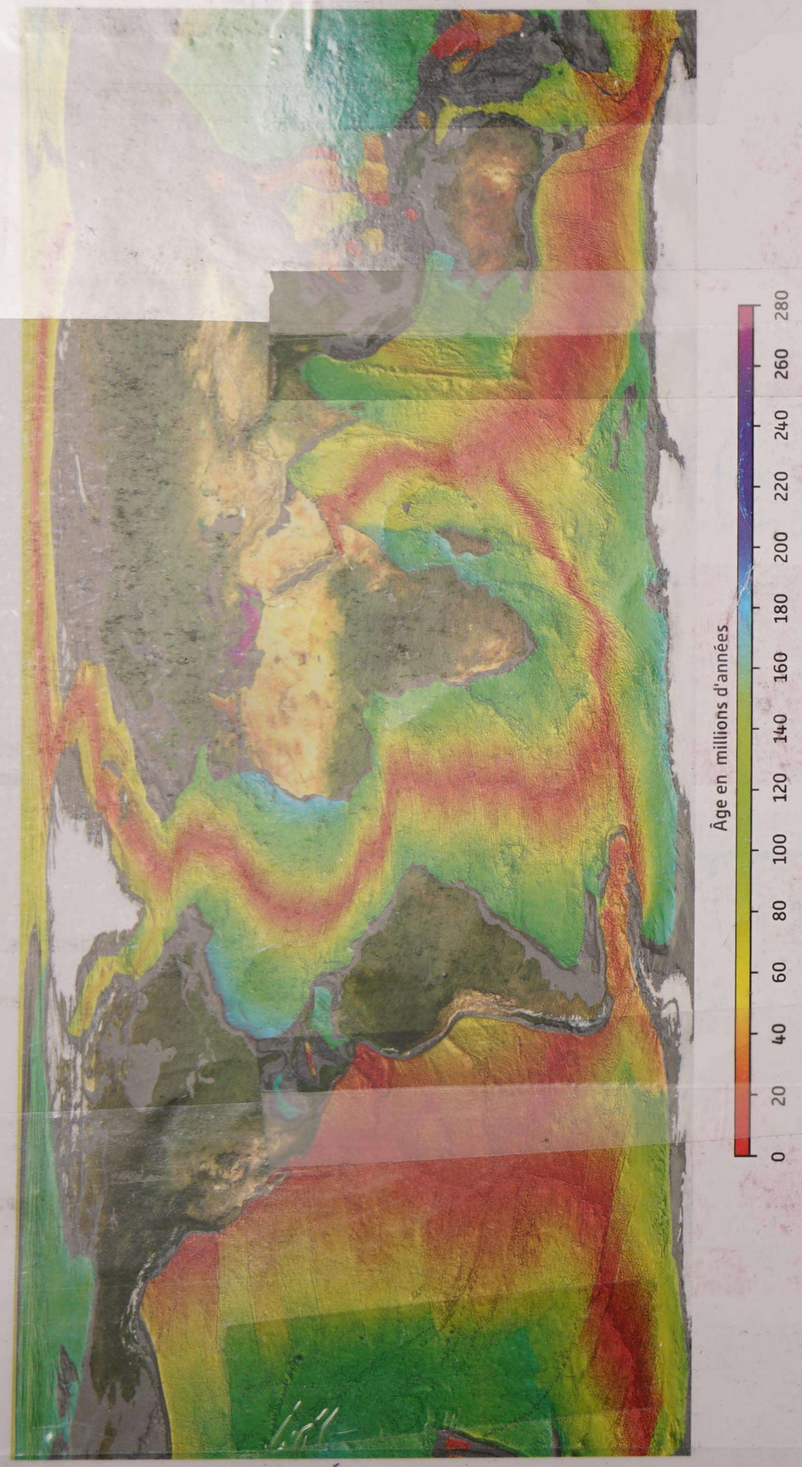
Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que «les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» [article L.122-5]; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche «toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» [article L.122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

DANGER
LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

IMPRIM'VERT®

Le papier sur lequel est imprimé cet ouvrage provient de forêts certifiées et gérées durablement.
Imprimé en France par Roto Aisne à Gauchy
N° d'édition : 006259-02 – N° d'imprimeur : 120700040
Dépôt légal : août 2012

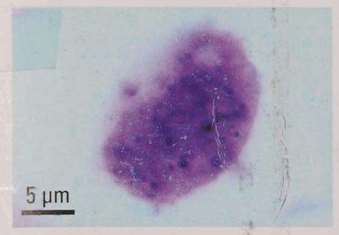
Carte de l'âge des fonds océaniques



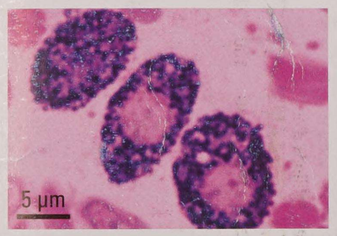
Quelques cellules immunitaire

Granulocyte : cellule au noyau plurilobé capable de réaliser la phagocytose. Localisation : sang et tissus.

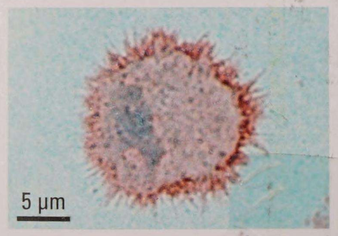
Monocyte : cellule au noyau en un seul lobe. De localisation sanguine, les monocytes peuvent quitter les vaisseaux pour gagner les tissus, où ils se différencient en macrophages.



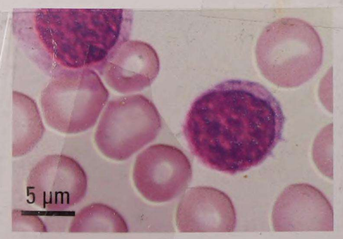
Macrophage : cellule au noyau arrondi dérivant des monocytes, capable de réaliser la phagocytose. Localisation : tissus.



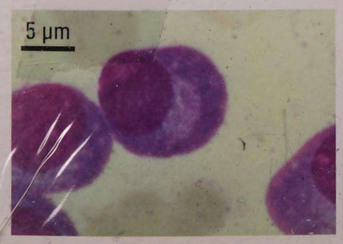
Mastocyte : cellule dont le cytoplasme contient de nombreuses vésicules remplies de médiateurs chimiques de l'inflammation. Localisation : tissus.



Cellule dendritique : cellule présentant de nombreux prolongements, qui contribue à l'initiation de la réaction inflammatoire aiguë et de la réponse immunitaire adaptative. Localisation : tissus et organes lymphoïdes secondaires.



Lymphocyte : cellule dont le noyau est de taille importante par rapport au cytoplasme. Les différents types de lymphocytes (T et B) sont des acteurs essentiels de la réponse immunitaire adaptative. Localisation : sang et organes lymphoïdes secondaires.

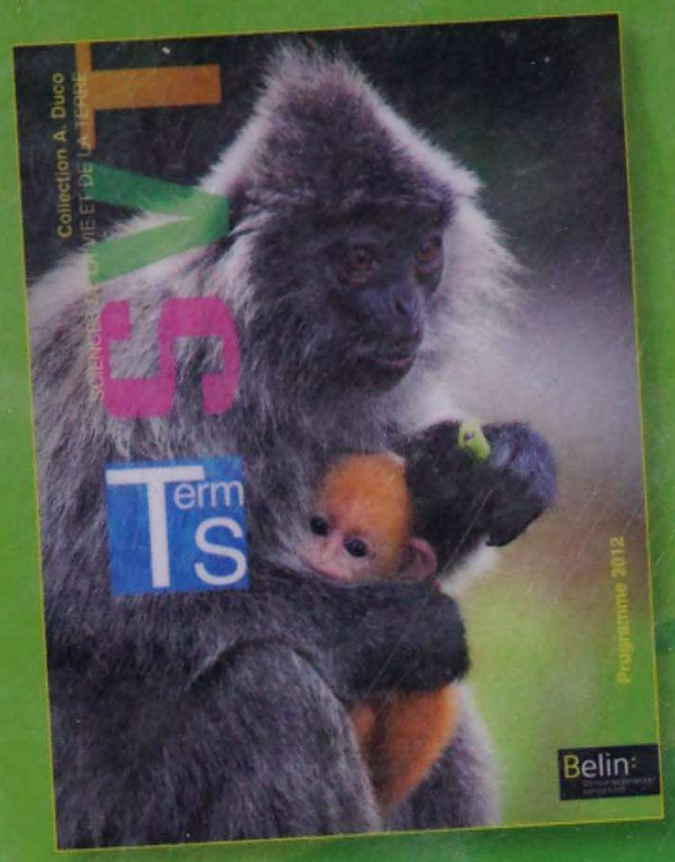


Plasmocyte : cellule sécrétrice d'anticorps issue de la différen… d'un lymphocyte B. Localisation : sang et organes lymph…

...e des temps géologiques

ÈRE		SYSTÈME	SÉRIE	ÂGE ABSOLU (en millions d'années)
CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE		Holocène	0,01
			Pléistocène	1,65
	TERTIAIRE	*NÉOGÈNE*	Pliocène	5,3
			Miocène	23,5
		PALÉOGÈNE	Oligocène	34
			Éocène	53
			Paléocène	65
MÉSOZOÏQUE	SECONDAIRE	*CRÉTACÉ*	Supérieur	96
			Inférieur	135
		JURASSIQUE	Supérieur	154
			Moyen	180
			Inférieur	205
		TRIAS	Supérieur	230
			Moyen	240
			Inférieur	245
PALÉOZOÏQUE	PRIMAIRE	*PERMIEN*		295
		CARBONIFÈRE	Supérieur	325
			Inférieur	355
		DÉVONIEN		410
		SILURIEN		435
		ORDOVICIEN		500
		CAMBRIEN		540
INFRAPALÉOZOÏQUE				4 500

...ique de France / BRGM



SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

SVT Term Ts

lesclésdubac

Une collection double pour réussir, qui s'adapte à chaque mode de préparation

TOUT POUR RÉUSSIR *l'année*

Pour viser le bon dossier ou la mention au Bac en se préparant régulièrement et progressivement toute l'année :

- ☑ **Cours** complet et structuré
- ☑ **Méthodes** expliquées
- ☑ **Exercices** progressifs et minutés
- ☑ **Annales** et **sujets** type Bac
- ☑ Tous les **corrigés** détaillés

Et des prolongements en ligne gratuits

TOUT POUR RÉUSSIR *l'examen*

L'essentiel pour assurer le jour du Bac :

- ☑ **Synthèses** de cours
- ☑ **Quiz** pour s'évaluer
- ☑ **Méthodes** de l'épreuve
- ☑ **Annales** et **sujets** type Bac par thématique ou complets
- ☑ Tous les **corrigés** détaillés

Et des prolongements en ligne gratuits

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

www.editions-belin.com
ISBN 978-2-7011-6259-1
9 782701 162591
Code 006259